

МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ

Д.01.01.133

На правах рукописи

УДК 624.12

МЕКЕНБАЕВ БАКТЫБЕК ТОИМАТОВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ
УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ**

Специальность 01.02.04 — Механика деформируемого
твёрдого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

БИШКЕК 2002

Диссертационная работа выполнена в Кыргызском государственном университете строительства, транспорта и архитектуры

Научные руководители: доктор технических наук, член-корреспондент НАН КР, профессор **ТЕНТИЕВ Ж. Т.**, кандидат физико-математических наук, СНС **КОЖАХМЕТОВ К. Х.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **АБДЫЛДАЕВ Э. К.**, кандидат технических наук **КОЖОБАЕВ Ж. Ш.**

Ведущая организация: Кыргызско-Российский (Славянский) университет



Защита диссертации состоится 17 мая 2002 г. в 13 часов на заседании Межведомственного диссертационного Совета Д.01.01.133 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в Кыргызском техническом университете им. И. Раззакова по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Мира, 66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кыргызского технического университета им. И. Раззакова.

Автореферат разослан 16 апреля 2002 г.

Ученый секретарь Межведомственного диссертационного Совета Д.01.01.133, кан. тех. наук, доц.

 **Ж. Д. РАБИДИНОВА**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Устойчивость откосов, бортов карьеров и отвалов является одним из основных вопросов при строительстве горных автодорог и разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. С ней связаны безопасность работ на горных склонах и в карьерах, вопросы технологии, предельные углы наклона откосов и бортов, предельная высота откосов и глубина карьеров. Большое значение имеет определение максимальных углов наклона устойчивых бортов карьеров. Это же касается и вопроса устойчивости откосов горных дорог. Завышенные углы откосов приводят к возникновению обрушений и оползней, которые причиняют большой ущерб предприятиям, нарушают нормальный технологический процесс строительства горных автодорог, добычных и вскрышных работ, ведут к большим потерям готового к выемке полезного ископаемого. Обрушения откосов и бортов опасны для работающих людей и механизмов.

Установление максимальных углов наклона откосов и бортов карьеров, при которых обеспечивается их устойчивость, требует всестороннего изучения в период разведки таких важных факторов, оказывающих влияние на величину углов, как литология, физико-механические свойства, трещиноватость горных пород и тектоника. К сожалению, не все эти факторы в разведочный период изучаются с необходимой полнотой, поэтому во многих случаях углы наклона откосов и бортов устанавливаются без учета этих факторов или же для определения углов производятся дорогостоящие специальные инженерно-геологические изыскания, дублирующие геологоразведочные работы.

На современном этапе развития науки создание пригодной для всех случаев горно-геологических и горно-технических ситуаций единой механико-математической модели расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости откосов и бортов не представляется возможным. Отсюда вытекает целесообразность строить расчетные модели, которые учитывали бы влияющие на НДС породного массива главные факторы, выявляемые с помощью экспериментов и данных натурных наблюдений.

Появление новых мощных вычислительных средств в настоящее время позволяет численно оценивать НДС породных массивов откосов с учетом их структурных неоднородностей, особенностей прочностных и деформационных свойств и т.д.

Из вышесказанного вытекает актуальность построения моделей расчета устойчивости откосов и карьеров с учетом главных влияющих горно-геологических и горно-технических факторов.

Предлагаемая работа посвящена развитию теоретических основ и разработке методов оценки устойчивости откосов горных дорог и бортов карьеров. Предлагаются гранично-элементные модели расчета напряженно-деформированного состояния породных массивов, влияния объемного веса породы.

Цель работы. На основе теории прочности Кулона-Мора разработать расчетные методы оценки устойчивости откосов горных дорог и бортов

карьеров. Усовершенствовать гранично-элементное моделирование применительно к задачам геомеханики.

Задачи исследований:

- на основе теории прочности Кулона-Мора вывести новые формулы для коэффициентов запаса прочности горного массива и устойчивости откосов;
- сформулировать функционал запаса устойчивости откосов для определения потенциальных поверхностей скольжения;
- разработать метод граничных элементов для решения задач механики, касающихся разрывов нагрузок на границе, и построить гранично-элементную модель оценки напряженно-деформированного состояния, учитывающий объемный вес горной породы;
- разработать методы оценки устойчивости откосов горных автомобильных дорог и бортов карьеров.

Методы исследований включают математико-механическое моделирование деформации породных массивов с использованием аналитических методов и численных расчетов с помощью компьютеров.

Научные положения, выносимые на защиту:

- формулы для коэффициентов запаса прочности горного массива и устойчивости откосов, зависимости потенциальной поверхности скольжения откоса от его коэффициента запаса прочности;
- зависимость угла внутреннего трения и сцепления от пределов прочности на сжатие и растяжение;
- функционал запаса устойчивости, минимизируя который, определяются потенциальные поверхности скольжения;
- метод разрывных граничных элементов для решения задач механики касающихся разрывов нагрузок на границе, а также гранично-элементную модель оценки НДС, учитывающую объемный вес горной породы;
- формулы для определения направления и величины удерживающих сил, методику определения направления и величины сдвигающих сил;

Научная новизна работы определяется результатами:

- выведены новые формулы для коэффициентов запаса прочности массива и устойчивости откоса;
- выявлено, что угол внутреннего трения и сцепление зависят от пределов прочности на сжатие и растяжение;
- дана вариационная формулировка задачи о нахождении потенциальной поверхности скольжения. В результате минимизации предлагаемого функционала запаса устойчивости в общем виде построены два семейства потенциальных поверхностей скольжения;
- разработаны метод граничных элементов для решения задач механики, касающихся разрывов нагрузок на границе, и гранично-элементная модель оценки напряженно-деформированного состояния, учитывающая объемный вес горной породы;

- получены формулы для определения направления и величины удерживающих сил и предложены методы оценки устойчивости откосов горных дорог и бортов карьеров.

Достоверность полученных результатов обоснована строгостью построения математических выкладок, корректностью постановки задач и методов их решения. Достоверность выводов и решений подтверждается также проверкой решений в сопоставимых случаях с известными решениями, сравнением результатов расчетов с результатами других авторов, а также с имеющимися данными экспериментов.

Практическая ценность работы определяется полученными в диссертации результатами, которые могут быть использованы при исследовании на устойчивость откосов горных дорог и бортов карьеров.

Отдельные конкретные результаты работы могут быть использованы научно-исследовательскими и проектными организациями, занимающимися вопросами расчетов на прочность в области строительства, машиностроения, горного дела и смежных с ними областях.

Личный вклад автора:

- выведены новые выражения для коэффициентов запаса прочности горного массива и устойчивости откосов;
- показано, что угол внутреннего трения и сцепление зависят от пределов прочности на сжатие и растяжение;
- сформулирована вариационная задача определения поверхностей скольжения;
- получены формулы для определения направления и величины удерживающих сил;
- разработаны методы удерживающих, касательных сил и возможного перемещения призмы обрушения для оценки на устойчивость откосов;
- составлены компьютерные программы для определения НДС горного массива и оценки на устойчивость откосов горных дорог и бортов карьеров.

Апробация работы. Основные научные положения, выводы и рекомендации апробированы на: II Всесоюзном семинаре «Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья» (г.Фрунзе, 1990), научно-технической конференции профессорской – преподавательского состава и студентов КАСИ (г.Бишкек, 1996), Международной конференции «Технологии и перспективы современного инженерного образования, науки и производства» (г. Бишкек, 1999), научном семинаре каф. механики КТУ им. И.Раззакова (г. Бишкек, 2000), республиканской научно-практической конференции «Проблемы строительной отрасли и пути их решения». (г. Бишкек, 2001), расширенном семинаре по механике Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 работах [1-11].

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 145 машинописных страницах, состоит из четырех глав, включает введение, заключе-

ние, список литературы из 171 наименований и приложения; она содержит 41 рисунок и 5 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе работы приводится обзор состояния и путей решения проблем устойчивости откосов и бортов карьеров. Существующие расчетные методы можно условно разбить на две группы, к первой из которых относятся методы, позволяющие определять коэффициент запаса устойчивости существующего откоса или склона по отношению к известной из каких-либо соображений или построенной поверхности разрушения (круглоцилиндрической, плоской, ломано-вогнутой и др.); ко второй группе относятся методы построения поверхности разрушения при заданном коэффициенте запаса, основанные на предварительном расчетном определении напряженно-деформированного состояния пород склона и сопоставлении величин напряжений с показателями прочности пород. Анализ существующих методов показал, что многофакторность процессов, трудности создания расчетных схем, учет особенностей строения и механизма движения масс пород обуславливают приближенность результатов расчетов и необходимость применения комплексных методов. Эти обстоятельства являются причиной того, что, несмотря на существование различных инженерных расчетных методов, общего метода расчета устойчивости откосов в настоящее время нет. В данной главе даны подробный обзор и анализ аналитических и численных методов оценки напряженно-деформированного состояния массивов горных пород.

Вторая глава посвящена исследованию коэффициента запаса прочности. Коэффициент запаса устойчивости определяется в виде отношения между удерживающими и сдвигающими силами, причем те и другие приложены вдоль поверхности разрушения. По теории Кулона-Мора коэффициент запаса определяется по формуле

$$k = \frac{\psi \sigma_n + c}{|\tau_n|} \quad (1)$$

где c - сцепление; $\psi = \operatorname{tgr} \rho$ - угол внутреннего трения; τ_n и σ_n - касательное и нормальное напряжения.

Для определения σ_n и τ_n имеют место известные формулы:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} - \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \cos 2\theta - \sigma_{12} \sin 2\theta, \\ \tau_n &= \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \sin 2\theta - \sigma_{12} \cos 2\theta \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_{ij} - компоненты тензора напряжения, θ - угол между касательной к возможной поверхности разрушения и осью x_1 .

Принимается, что сжимающему напряжению соответствует положительный знак, а растягивающему - отрицательный.

Учитывая (2) и формулу

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\sigma_{12}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}},$$

где φ - направление главного напряжения σ_1 ,

из (1) получим

$$k = \psi \frac{\sigma / \tau - \cos 2(\theta - \varphi)}{|\sin 2(\theta - \varphi)|}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \tau &= \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2} / 2, \\ \sigma &= (\sigma_{11} + \sigma_{22}) / 2 + c / \psi. \end{aligned}$$

Из (4) видим, что при заданных размерах выработки и физико-механических характеристик массива коэффициент запаса прочности в точке в любой фиксированный момент времени является функцией угла θ .

Для нахождения минимального значения коэффициента запаса прочности в данной точке продифференцируем k по θ и, приравняв числитель к нулю, будем иметь (далее минимальное значение коэффициента запаса прочности будем обозначать k)

$$k = \psi |\operatorname{tg} 2(\theta - \varphi)|. \quad (4)$$

Из (3) и (4) будем иметь формулу для коэффициента запаса прочности

$$k = 2 \sqrt{\frac{(\psi \sigma_{11} + c)(\psi \sigma_{22} + c) - \psi^2 \sigma_{12}^2}{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2}} \quad (5)$$

или в главных напряжениях

$$k = 2 \sqrt{\frac{(\psi \sigma_1 + c)(\psi \sigma_2 + c)}{\sigma_1 - \sigma_2}}. \quad (6)$$

Из (6) после несложных преобразований получим

$$(k^2 + \psi^2)[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2] = [\psi(\sigma_{11} + \sigma_{22}) + 2c]^2.$$

Отсюда при $k = 1$ вытекает условие предельного равновесия

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2 = \sin^2 \rho (\sigma_{11} + \sigma_{22} + 2c_0)^2.$$

Формулы (5) и (6) не зависят от направления поверхности возможного разрушения (т.е. от угла θ) и определяют минимальное значение коэффициента запаса прочности в рассматриваемой точке.

Произведя подстановку

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{\operatorname{tgr} \rho}{k}, \quad (7)$$

из формулы (4) после несложных преобразований имеем

$$\theta = \varphi \mp \varepsilon',$$

где

$$\varepsilon' = 45^\circ - \xi / 2 \quad (8)$$

- угол между направлениями главного напряжения и потенциальной поверхностью разрушения.

При $k=1$ из (8) следует основная зависимость предельного равновесия

$$\varepsilon = 45^\circ - \rho/2.$$

Анализ полученных выше формул показывает, что в каждой точке массива существуют две поверхности разрушения. Из (8) видно, что они наклонены к направлению напряжения σ_1 под углами $\mp \varepsilon'$ и пересекаются между собой под углом $2\varepsilon'$. Эти поверхности образуют систему двух изогональных семейств. Семейство поверхностей разрушения, определяемое верхним знаком «-», образует первое семейство, а семейство, определяемое нижним знаком «+» - второе семейство.

Если разрешить (3) относительно $\operatorname{tg}\theta$ при учете (5), то для определения направления коэффициента запаса прочности можно получить формулу

$$k = \frac{c \sin \theta + \psi(\sigma_{11} \sin \theta - \sigma_{12} \cos \theta)}{\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \cos \theta + \sigma_{12} \sin \theta} \quad (9)$$

Из (3) и (8) получим еще одну формулу

$$k = \frac{c \cos \theta + \psi(\sigma_{22} \cos \theta - \sigma_{12} \sin \theta)}{\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \sin \theta - \sigma_{12} \cos \theta} \quad (10)$$

Разные формы коэффициента запаса прочности даны в табл. 1.

Формула (9) зависит от отношения вертикальных составляющих удерживающих и сдвигающих сил, а (10) от горизонтальных составляющих.

Предел текучести при сжатии

$$\sigma_T^c = 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ + \rho/2). \quad (11)$$

Предел текучести при растяжении

$$\sigma_T^p = -2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \rho/2). \quad (12)$$

Предел текучести при чистом сдвиге

$$\tau_T = c \operatorname{cosp}. \quad (13)$$

Из (11) и (12) получим формулы, которые показывают, что сцепление и угол внутреннего трения зависят от пределов прочности при сжатии σ_T^c и растяжении σ_T^p , т.е.

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_T^c |\sigma_T^p|},$$

$$\operatorname{tg} \rho = \psi = \frac{\sigma_T^c - |\sigma_T^p|}{2 \sqrt{\sigma_T^c |\sigma_T^p|}}.$$

В данной главе показано, что если поверхность разрушения представляет собой плоскость, то компоненты напряженного состояния описывается линейными функциями. т.е.

$$k\sigma_{12} = \mp 2\psi\gamma x_2 + m,$$

$$k \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} = \pm \psi\gamma x_1 + p,$$

Таблица 1

Разные представления коэффициента запаса прочности k

| Коэффициенты запаса прочности. | Частный случай: c=0 | Частный случай: p=0 |
|---|---|---|
| $k = 2 \frac{\sqrt{(\psi\sigma_1 + c)(\psi\sigma_2 + c)}}{\sigma_1 - \sigma_2}$ | $k = 2\psi \frac{\sqrt{\sigma_1\sigma_2}}{\sigma_1 - \sigma_2}$ | $k = \frac{2c}{\sigma_1 - \sigma_2}$ |
| $k = \frac{c \sin \theta + \psi(\sigma_{11} \sin \theta - \sigma_{12} \cos \theta)}{\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \cos \theta + \sigma_{12} \sin \theta}$ | $k = \frac{\psi(\sigma_{11} \sin \theta - \sigma_{12} \cos \theta)}{\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \cos \theta + \sigma_{12} \sin \theta}$ | $k = \frac{c \sin \theta}{\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \cos \theta + \sigma_{12} \sin \theta}$ |
| $k = \frac{c \cos \theta + \psi(\sigma_{22} \cos \theta - \sigma_{12} \sin \theta)}{\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \sin \theta - \sigma_{12} \cos \theta}$ | $k = \frac{\psi(\sigma_{22} \cos \theta - \sigma_{12} \sin \theta)}{\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \sin \theta - \sigma_{12} \cos \theta}$ | $k = \frac{c \cos \theta}{\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \sin \theta - \sigma_{12} \cos \theta}$ |
| $k = \frac{(\psi(\sigma_{11} + c) \sin^2 \theta - (\psi\sigma_{22} + c) \cos^2 \theta)}{\sigma_{11} - \sigma_{22}}$ | $k = \frac{\psi(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \sin 2\theta - 2\psi\sigma_{12}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}}$ | $k = \frac{2c \sin 2\theta}{\sigma_{11} - \sigma_{22}}$ |
| $k = \frac{(\psi\sigma_{11} + c) \sin^2 \theta - (\psi\sigma_{22} + c) \cos^2 \theta}{\sigma_{12}}$ | $k = \frac{\psi(\sigma_{11} \sin^2 \theta - \sigma_{22} \cos^2 \theta)}{\sigma_{12}}$ | $k = \frac{c \cos 2\theta}{\sigma_{12}}$ |

где m, p - постоянные.

При $\rho=0$

$$k \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} = c \sin 2\theta,$$

$$k\sigma_{12} = -c \cos 2\theta.$$

В третьей главе дана вариационная формулировка задачи определения поверхностей разрушения. Пусть на откос действуют внешние силы R_i (рис. 1).

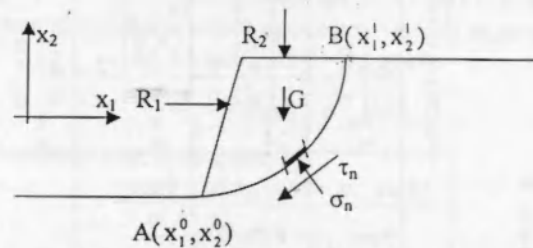


Рис. 1. Призма обрушения. R_i - внешние силы, G - вес призмы обрушения

Коэффициент запаса устойчивости откоса определяется по формуле

$$K = \frac{\int_A^B (\sigma_n \psi + c) ds}{\int_A^B |\tau_n| ds}.$$

Здесь числитель и знаменатель представляют собой удерживающую и сдвигающую нагрузки соответственно. Разность удерживающей и сдвигающей нагрузок называют запасом устойчивости откосов. Запас устойчивости откосов зависит от формы поверхности скольжения, поэтому он является функционалом от функции $x_2 = x_2(x_1)$. Для определения поверхностей разрушения будем минимизировать функционал запаса устойчивости

$$I = (\psi U_{,s} \mp U_{,n}) \Big|_{x_1^0}^{x_1^1} + \int_{x_1^0}^{x_1^1} (c - \gamma \psi x_2 + \mu) ds,$$

где μ - постоянная, U - функция напряжения.

Решением функционала будут

$$x_2 - \omega = C_2 \operatorname{ch} \frac{x_1 - C_3}{C_2}, \quad (14)$$

где C_2, C_3 - постоянные, $\omega = \frac{c + \mu}{\gamma \psi}$.

Одно семейство поверхностей скольжения описывается уравнением (14). Второе семейство определяется из условия изогональности кривых.

Для несомого откоса ($\gamma = 0$) одно семейство скольжения - прямые, а

другое семейство - логарифмические спирали.

Для идеально связной среды ($\rho = 0$) одно семейство состоит из прямых линий, другое - из окружностей.

Четвертая глава посвящена разработке гранично-элементных моделей расчета напряженно-деформированного состояния породных массивов с учетом основных горно-геологических и горно-технических факторов, а также влияния объемного веса породы. В предлагаемой работе принимается прямой метод граничных элементов (ПМГЭ), который по сравнению с другими численными методами имеет следующие преимущества: уменьшение объема вычислений вследствие дискретизации не всей рассматриваемой области, а только ее границы; значительное сокращение времени на подготовку входной информации; возможность вычислять в линейных задачах значения искомых величин не только в узлах, но и в любой внутренней точке области, не прибегая к аппроксимации, что особенно важно для зон с большими градиентами функций; автоматический учет условий на бесконечности; сравнительная простота решения разнообразных контактных задач (задачи о трещинах, о системах слоев и блоков и т.д.), обусловленная тем, что в ПМГЭ легко связывать усилия и разрывы смещений на контактах.

Граничные интегральные уравнения (ГИУ) для случая плоской теории упругости имеет вид

$$C_{ik} u(\xi) = \int_{\Gamma} [p_i(x) U_i^{(k)}(x, \xi) - u_i(x) p_i^{(k)}(x, \xi)] d\Gamma(x) + \int_S f_i(\bar{x}) U_i^{(k)}(\bar{x}, \xi) dS(\bar{x}),$$

где S - площадь поперечного сечения тела, Γ - контур области S ; $x \in \Gamma$, $\xi \in S$; $\bar{x} \in S$; F_1, F_2 - проекции на оси координат объемной силы \vec{F} ; p_i, u_i - соответственно усилие и перемещение на контуре области; $U_i^{(k)}, p_i^{(k)}$ - фундаментальные решения; x, ξ - соответственно точки наблюдения и приложения единичной нагрузки; C_{ik} - числовая матрица, зависящая только от локальной геометрии контура Γ в точке ξ ; $x, \xi \in \Gamma$; $\bar{x}, \bar{\xi} \in S$.

Последний интеграл, содержащий объемный вес после интегрирование приводится к следующему виду

$$\Phi_k(\xi) = -\frac{F_i}{16(1-\nu)\pi\mu} \int_{\Gamma} \left[\frac{\partial r}{\partial x_i} \frac{\partial r}{\partial x_k} - (3-4\nu)\delta_{ik} \left(\ln r - \frac{1}{2} \right) \right] r \frac{\partial r}{\partial x_i} n_i(x) d\Gamma(x),$$

где $r = \sqrt{(\bar{x}_1 - \xi_1)(\bar{x}_1 - \xi_1)}$.

Дискретизация границ осуществлялась линейными элементами. Как альтернатива обычной процедуре численного решения задач по прямому методу граничных элементов предложено замкнутое представление разрешающих уравнений метода путем аналитического вычисления их интегральных коэффициентов.

Обычно численные вычисления интегралов неудобны при наличии угловых точек, так как в этих точках происходит резкое изменение направления нормали к поверхности и, следовательно, граничных нагрузок. Для

преодоления этого взамен «двоенных узлов» введены «разрывные элементы», позволяющие существенно сократить вычислительную процедуру и время компьютерного счета при решении конкретных задач, особенно при решении обширного класса задач с входящими углами, где важнее всего знать решение на геометрическом разрыве и вблизи него.

В данной главе предложен метод удерживающих сил. Учитывая усилия на потенциальной поверхности разрушения, из (9) и (10) получим

$$\psi p_1 + c \sin \theta - \left(k \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \cos \theta + k \sigma_{12} \sin \theta \right) = 0, \quad (15)$$

$$\psi p_2 + c \cos \theta - \left(k \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \sin \theta - k \sigma_{12} \cos \theta \right) = 0$$

Сумма первых двух членов верхнего уравнения представляет собой силу трения. Чтобы рассматриваемый элемент поверхности разрушения в вертикальном направлении находился в равновесии, необходимо вертикальную сдвигающую силу умножить на коэффициент запаса прочности. На потенциальной поверхности разрушения эта сумма равна нулю. Второе уравнение (15) показывает равновесие сил в горизонтальном направлении.

В предельном случае ($k=1$), уравнения (15) обозначают равенство нулю суммы вертикальных и горизонтальных составляющих удерживающих и сдвигающих сил. Следовательно, сумма их проекций на потенциальной поверхности разрушения также равна нулю. Поэтому удовлетворяется уравнение (1) в любой точке поверхности разрушения.

Числитель формулы (1) представляет собой проекцию удерживающего усилия u_n на поверхность разрушения, а знаменатель - сдвигающего усилия t_n (рис.2). Значит, уравнения (1) необходимо применять к потенциальной поверхности разрушения.

С помощью формулы (7), (8) из (15) получим

$$\operatorname{tg}(\theta - \xi) = \frac{c \sin \theta + \psi p_1}{c \cos \theta + \psi p_2}. \quad (16)$$

Здесь дано отношение вертикальных и горизонтальных составляющих удерживающих усилий. Коэффициент запаса прочности зависит от этого отношения. В предельном случае угол между удерживающей силой и касательной к поверхности скольжения равен углу внутреннего трения.

Призму обрушения разобьем на n блоков. Учитываются только нормальные силы между блоками. Для каждого блока напишем уравнение (16), после чего, сложив эти уравнения между собой, имеем

$$F = \sum_{i=1}^n \operatorname{tg}(\theta_i - \xi) [c \Delta_{1i} + \psi G_i] - c \Delta_2 + \psi k_c G = 0, \quad (17)$$

где n - количество блоков, θ_i , G_i , Δ_{1i} - соответственно угол наклона основание, вес и ширина i -блока, k_c - коэффициент сейсмичности.

При учете сил трения между блоками уравнения (17) примут вид

$$F = \sum_{i=1}^n \left[\Delta_{1i} + \Delta_{1i} \operatorname{tg} \theta_i \operatorname{tg} \delta + \frac{\psi}{c} G_i \right] \operatorname{tg}(\theta_i - \delta - \xi) - \Delta_2 + \Delta_1 \operatorname{tg} \delta + \frac{\psi \operatorname{tg} \delta G}{c} = 0, \quad (18)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ - коэффициент трения между блоками.

Формулы (17) и (18) можно применять для любой формы поверхности разрушения, а также учитывать трещины отрыва. Если определяются предельные параметры откоса, то вместо δ необходимо ставить ρ . При определении коэффициента запаса устойчивости откоса при заданных параметрах вместо δ следует ставить ξ .

Эффективным способом решения уравнений (17), (18) является метод касательных Ньютона.

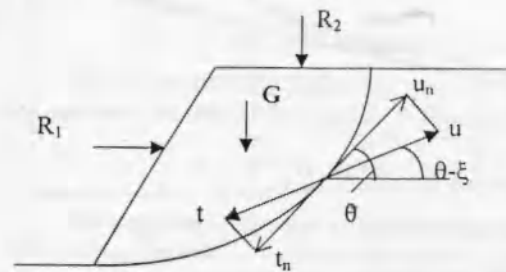


Рис. 2. Направления сдвигающих и удерживающих усилий: t , u - соответственно сдвигающие и удерживающие усилия, θ - угол наклона касательной, $\theta - \xi$ - направления сдвигающих и удерживающих усилий

Во многих работах задается условная высота откоса H' , а действительная определяется по формуле

$$H = \frac{c}{\gamma} H'.$$

На рис. 3 показана зависимость величины $1/H'$ от угла наклона откоса для $\rho=15^\circ$. Сравниваются результаты, полученные по данной методике, с другими известными методами: 1 - по методу моментной точки; 2 - по методу Г.Л.Фисенко; 3 - по методу И.И.Попова; 4 - по формуле (17) без учета сил трения между блоками; 5 - по формуле (18) с учетом сил трения; 6 - по формуле (17) без учета трещины отрыва.

Из рис. 3 видно, что результаты, полученные по формулам (17) и (18), близки к результатам по более точным методам.

Для определения направления и величины удерживающей силы U выведены формулы

$$\operatorname{tg}(\theta' - \xi) = \frac{c \Delta_2 + \psi R_1}{c \Delta_1 + \psi(G + R_2)}; \quad (19)$$

$$U = \sqrt{(c \Delta_2 + \psi R_1)^2 + (c \Delta_1 + \psi(G + R_2))^2}. \quad (20)$$

где θ' - направление касательной сдвигающей силы T_n .

Из (15) и (16) видно, что сдвигающие U и удерживающие T силы лежат на одной прямой и направлены в противоположные стороны.

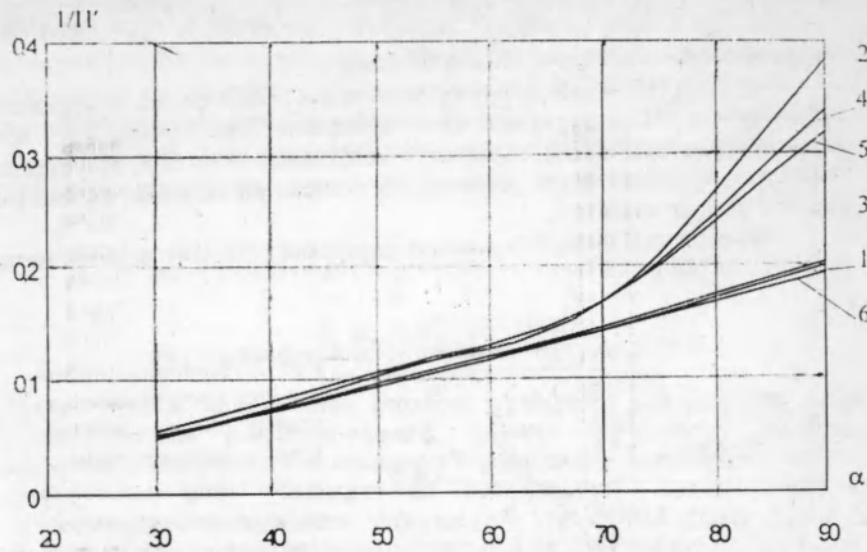


Рис. 3. Зависимость $1/N'$ от угла наклона, откоса для $\rho=15^\circ$

Следовательно, будет удовлетворяться следующее равенство:

$$\left(\begin{array}{c} \text{коэффициент} \\ \text{устойчивости} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{сдвигающая} \\ \text{сила} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{удерживающая} \\ \text{сила} \end{array} \right)$$

или

$$KT = U. \quad (21)$$

Если на потенциальной поверхности разрушения известна величина T_n касательных сдвигающих сил, то по формуле (рис. 4)

$$K = \frac{U \cos \xi}{T_n}$$

можно найти коэффициент запаса устойчивости.

В случае же, если известно направление действия T_n , то

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{\operatorname{tg} \theta' - \operatorname{tg}(\theta' - \xi)}{1 + \operatorname{tg} \theta' \operatorname{tg}(\theta' - \xi)}. \quad (22)$$

После этого по формуле

$$K = \operatorname{tg} \rho / \operatorname{tg} \xi, \quad (23)$$

найдем коэффициент запаса устойчивости откоса. Чтобы найти сдвигающую силу T на потенциальной поверхности разрушения, необходимо знать величины ее проекций. Если T_n неизвестна, то призму обрушения разбиваем на блоки.

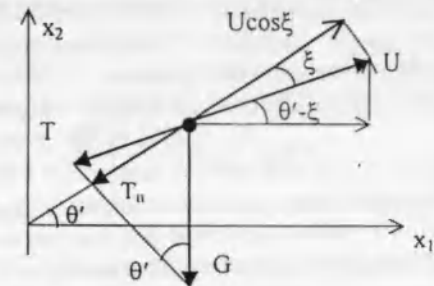


Рис. 4. К определению сдвигающей силы

При этом значение равнодействующей T_n определяется путем сложения векторов касательных усилий на поверхности возможного разрушения

$$T_n = \sqrt{\left(\sum_1^n G_i \sin^2 \theta_i \right)^2 + \left(\sum_1^n G_i \sin \theta_i \cos \theta_i \right)^2}.$$

Направление действия касательной сдвигающей силы совпадает с направлением возможного движения призмы обрушения. Это положение можно применять для определения θ' . Под действием внешних сил и объемного веса точки призмы обрушения получают перемещения. Усреднив направления перемещений частиц, найдем направления возможного движения призмы обрушения. Направления возможного движения призмы обрушения определяются по принципу возможного перемещения. Будем считать, что частицы i -го блока получают по направлению основания θ_i одно и то же перемещение. Сумма перемещений частиц данного блока δv_i пропорциональна его весу G_i . Такое же допущение принимается и для других блоков. Одному из блоков сообщим возможное перемещение. Перемещение соседних блоков связано соотношением $\delta v_i \cos \theta_i = \delta v_{i-1} \cos \theta_{i-1}$. По данной рекуррентной формуле определяются перемещения частиц всех других блоков. Затем, сложив векторы перемещений, найдем направление вектора возможного перемещения призмы обрушения

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{\sum_1^n G_i \operatorname{tg} \theta_i}{\sum_1^n G_i}$$

Затем по соотношению (22) определяем тангенс угла между направлениями удерживающих и сдвигающих сил, после чего из (23) — находим коэффициент запаса устойчивости откосов.

При $\epsilon=0$ поверхность разрушения совпадает с поверхностью откоса. В предельном случае имеем $\theta' = \rho$. Если $\rho=0$, то

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{\Delta_2}{\Delta_1}.$$

и направление удерживающей силы совпадает с направлением хорды поверхности разрушения, а ее величина определяется по формуле

$$U = c_1 \Delta_1^2 + \Delta_2^2 = cL,$$

где L - длина хорды поверхности разрушения.

Коэффициент запаса устойчивости для этого случая имеет вид

$$k = \frac{cL}{G \sin \theta} = \frac{c(\Delta_1^2 + \Delta_2^2)}{G \Delta_2}.$$

Далее в четвертой главе решены конкретные задачи и приведен сравнительный анализ полученных при этом результатов по предлагаемой методике и с применением других существующих методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы по теме диссертации:

1. С помощью критерия прочности Кулона-Мора получены новые выражения для определения коэффициента запаса прочности горных пород.
2. Показано, что коэффициент запаса прочности является инвариантной величиной и от него зависит угол между главным напряжением и потенциальной поверхностью разрушения, а углы внутреннего трения и сцепление зависят от пределов прочности на сжатие и растяжение.
3. Получен функционал запаса устойчивости. В результате минимизации предлагаемого функционала запаса устойчивости в общем виде построены два семейства потенциальных поверхностей скольжения.
4. Разработана гранично-элементная модель решения задач механики, касающихся разрывов нагрузок на границе. Она существенно упрощает численное решение задач о НДС кусочно-неоднородных сред на основе «двойных узлов» и учитывает объемные силы (гравитацию) посредством сохранения интегралов, в основных граничных интегральных уравнениях.
5. Разработаны методы определения величины и направления, удерживающих и сдвигающих сил, а также направление возможного движения призмы обрушения.
6. Разработаны методы удерживающих, касательных сил и возможного перемещения призмы обрушения для оценки устойчивости откосов.
7. Разработаны компьютерные программы для определения НДС горного массива и устойчивости откосов, горных дорог и бортов карьеров.

Основное содержание диссертации отражено в 11-ти работах:

1. К расчету объемных сил в методе граничных элементов (соавтор К.Х.Кожаметов) // Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых в условиях высокогорья. - Фрунзе: Илим, 1990, с.85-90.
2. Гранично-элементный метод решения задач механики деформируемого тела с разрывными граничными условиями (соавтор К.Х.Кожаметов) // Исследования по напряженно-деформированному состоянию, устойчивости и разрушению деформируемых сред. Ч.2. - Бишкек: Илим, 1996, с.74-82.

3. Аналитическое исследование устойчивости откосов (соавтор Ж.Т.Тентиев) // Исследования по напряженно-деформированному состоянию, устойчивости и разрушению деформируемых сред. Ч.1. - Бишкек: Илим, 1996, с.121-144.
4. Исследование коэффициента запаса устойчивости // Материалы 3-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов КАСИ. - Бишкек, 1999, с.70-75.
5. К теории прочности Мора // Вестник МУК, 1999, №1, с. 48-50.
6. Разные представления коэффициента запаса устойчивости // Вестник КТУ, 1999, №2, с.149-155.
7. О прочности хрупких тел (соавтор Ж.Т.Тентиев) // Материалы международной научной конференции «Технологии и перспективы современного инженерного образования, науки и производства». Бишкек: КТУ, 1999, с.224-230.
8. Потенциальные поверхности разрушения // Материалы 3-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов КАСИ. - Бишкек: 1999, с.113-120.
9. Новый подход к оценке устойчивости откосов (соавтор Ж.Т.Тентиев) // Материалы научного семинара кафедры механики. - Бишкек, 2000, с.107-117.
10. Гранично-элементная модель расчета устойчивости откосов автомобильных дорог на горных склонах (соавтор С.Ж.Жумуков) // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию образования строительного факультета «Проблемы строительства и архитектуры на пороге XXI века». Бишкек-2000. Ч.2., с.121-129.
11. Расчетные методы оценки устойчивости откосов (соавторы Ж.Т.Тентиев, К.Х.Кожаметов). - Бишкек: «Кыргызстан», 2000, 163 с.

Аннотация

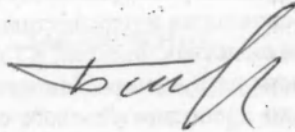
Кулон-Мордун бекемдүүлүк критерийинин негизинде жантаймалардын туруктуулугун аныктоо үчүн формулалар алынды. Кармоочу жана жылдыруучу күчтөрдүн багыттарын жана чоңдуктарын аныктоо ыкмалары сунуш кылынды. Жантаймалардын туруктуулугун баалочу ыкмалар иштелип чыкты. Предельдик абалда кармоочу жана жаңдама жылдыруучу күчтөрдүн багыттарынын арасындагы бурч ички сүрүлүү бурчуна барабар болоору аныкталды.

Аннотация

На основе критерия прочности Кулона-Мора получены формулы для определения коэффициента запаса устойчивости откосов. Предложены методы определения направления и величины удерживающих и сдвигающих сил. Разработаны методы оценки на устойчивость откосов. Установлено, что в предельном случае угол между направлением удерживающей и касательной сдвигающей силами равен углу внутреннего трения.

Annotation (Summary)

The formulas for definition of acclivities's assurance stability coefficient is derived on the basis of yardsick strength criterion of Kulon-Mohr. Direction and value of both retaining and shear forces definition methods are offered. Is defined that in critical case the-angle between directions of retaining shear forces is equal to the angle of the internal friction.



МЕКЕНБАЕВ БАКТЫБЕК ТОЙМАТОВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА
МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ**

Тех.редактор *К.Б. Исраилов*

Подписано в печать 16.04.2002 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.
Бумага офс. Печать офс. Объем 1,00 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 151.

720044, Бишкек, ул. Сухомлинова, 20

ИЦ "Текник", т.: 42-14-55