



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ”,

МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА: ОТКРИТО РАЗРАБОТВАНЕ НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ И
ВЗРИВНИ РАБОТИ

Маг.инж. Ксиаолинг Ли-Щерева

ИЗБОР НА МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА РАБОТЕН
БОРД И ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ТЕХНОЛОГИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен "Доктор"
Професионално направление: 5.8 „Проучване, добив и обработка на полезни
изкопаеми“, Научна специалност: „Открит и подводен добив на полезни изкопаеми“

Научни консултанти:

1. Проф.д-р Ивайло Копрев
2. Доц.д-р Мариана Трифонова

СОФИЯ, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Открито разработване на полезни изкопаеми и взривни работи“ към Миннотехнологичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, на 04.10.2019 г., съгласно Ректорска заповед № Р-801 от 2.10.2019 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № Р- 875 от 18.10.2019 г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на 19.12.2019 г. от 10.00 часа в зала 220 на Миннотехнологичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. Проф.д-р Ивайло Георгиев Копрев – председател, вътрешен
2. Доц.д-р Евгения Иванова Александрова – вътрешен
3. Проф.д-р Владимир Иванов Костов – външен
4. Проф.д-р Зоран Деспотов – външен
5. Проф. Цай Чинсиан – външен

Резервни членове:

1. Доц.д-р Мариана Трифонова-Драганова - вътрешен
2. Проф.д-р Паулин Георгиев Златанов - външен

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1. проф. д-р Владимир Иванов Костов
2. доц. д-р Евгения Иванова Александрова

Дисертантът е на самостоятелна подготовка към катедра „Открито разработване на полезни изкопаеми и взривни работи“ на Миннотехнологичен факултет.

Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: Маг.инж. Ксиаолинг Ли-Щерева

Заглавие: Избор на методи за оценка на устойчивостта на работен борд и възможност за технологично въздействие

Тираж: 20 броя

СЪДЪРЖАНИЕ НА АВТОРЕФЕРАТА

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	5
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	8
ГЛАВА 1. СЪВРЕМЕННО ОПРЕДЕЛЕНИЕ НА ПОНЯТИЕТО УСТОЙЧИВОСТ НА ОТКОСИТЕ НА СЪПАЛАТА И БОРДОВЕТЕ НА ОТКРИТИТЕ РУДНИЦИ И МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА	8
1.1 Актуалност на въпроса, свързан с устойчивостта на откосите в открити рудници и кариери	8
1.2 Теоретични постановки за оценка на устойчивост на откосите	9
1.3 Анализ на приложимите методи за оценка на устойчивостта на откосите	11
1.3.1 <i>Методи, основаващи се на инженерно-геоложките условия на масива</i>	11
1.3.2 <i>Метод за анализ на граничното равновесие</i>	11
1.3.3 <i>Метод на граничния анализ</i>	11
1.3.4 <i>Числени методи за анализ</i>	11
1.3.5 <i>Вероятностни методи</i>	12
1.4 Съвременни възгледи за оценка на инженерните решения за осигуряване на устойчивостта на откосите	12
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТВАНЕ НА АКТУАЛНА, СЪОТВЕТСТВАЩА НА СЪВРЕМЕННИТЕ ИЗИСКВАНИЯ КЛАСИФИКАЦИЯ НА МЕТОДИТЕ ЗА ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА ОТКОСИТЕ	13
2.1 Обосноваване на критерии за актуализиране на класификациите на методите за оценка на устойчивостта на откоси	13
2.2. Интуитивни методи	16
2.3 Група методи, основани на анализа на граничното равновесие	16
2.3.1. <i>Подгрупа на методите на монолитното тяло</i>	16
2.3.2. <i>Подгрупа методи на отрезите (ламелите).</i>	16
2.4 Група методи, основани на граничния анализ	18
2.4.1. <i>Подгрупа методи, основани на анализа на допустимите деформации</i>	19
2.4.2 <i>Методи на дискретна оптимизация</i>	19
2.4.3 <i>Подгрупа методи, основани на анализа на допустимите напрежения</i>	20
2.5 Група вероятностни методи за анализ	23
2.6 Група комбинирани методи с използване на ГИС	23
2.7 Група геолого-структурни методи	24
2.8 3D-модели за оценка на устойчивостта на откоси	25
Изводи	26
ГЛАВА 3. ТЕНДЕНЦИИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ОЦЕНКАТА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА ОТКОСИ	27
3.1 Оптимизиране на плъзгателната повърхнина	27
3.2 Вероятностен анализ и анализ на чувствителността на метода	31
3.3 Изследване на влиянието на физико-механичните показатели върху поведението на скалния масив	32

3.4 Приложение на вероятностния подход за оценка на устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново-север“, мини „Марица-изток“ АД	36
Изводи	38
ГЛАВА 4. ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ ЗА ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА ОТКОСИ	38
4.1 Характерни особености на Метода на крайните елементи (МКЕ)	38
4.2. Приложение на МКЕ при условия на слаби скали (глини)	39
4.2.1. <i>Обща постановка</i>	39
4.2.2. <i>Физически нелинейни задачи</i>	40
4.2.3. <i>Итеративни методи за приложение на МКЕ при слаби скали</i>	40
4.2.4. <i>Природните фактори като причина за поставяне на нелинейна задача</i>	41
4.2.5 <i>Метод на пълзящата изчислителна схема</i>	42
4.3. Приложение на МКЕ за условията на рудник „Трояново-север“, Мини „Марица-изток“ АД	43
4.4. Приложение на ANSYS програма за оценка на устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново-север“	49
Изводи	55
ГЛАВА 5. ПРИНЦИПНИ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ ИЗБОРА НА МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА РАБОТЕН БОРД И ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ТЕХНОЛОГИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ	55
5.1 Вземане на решение за технологично въздействие върху устойчивостта на работен борд в условия на неопределеност на природната среда	55
5.2 Вземане на решения за технологично въздействие върху устойчивостта на работните бордове в открити рудници при отчитане на фактора време	60
5.3 Мероприятия за технологично въздействие върху устойчивостта на откосите и бордовете в открити рудници	61
5.3.1 <i>Общи положения</i>	61
5.3.2 <i>Преоткосиране на стъпалата до граничното им положение</i>	61
5.3.3 <i>Укрепване на слаби участъци в откосите и бордовете на откритите рудници</i>	61
5.3.4 <i>Обезпечаване на общата устойчивост на бордовете в откритите рудници и насипищата</i>	63
5.4 Избор на ефективни инженерно-технически мероприятия за въздействие върху устойчивостта на бордовете в реални условия	63
Изводи	64
Заклучение	65
Основни научни приноси в дисертационния труд	68
Научни публикации на автора, свързани с дисертационния труд	70
Литература	71
SUMMARY	73

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Съвременното ниво на развитие на открития добив се характеризира с усвояване на находища със сложни хидрогеоложки и инженерно–геоложки условия, интензификация на минните работи, значително увеличаване на параметрите на рудниците. Количествените и качествените изменения в техниката и технологията на откритото разработване изискват и коренни изменения в осигуряването на безопасна работа в рудниците.

Устойчивостта на бордовете и стъпалата в откритите рудници е един от основните въпроси при разработването на находищата на полезни изкопаеми по открит начин. Той възниква през всички етапи на разработване на дадено находище на полезни изкопаеми, особено през периода на неговата експлоатация. Изборът на подходящ изчислителен метод за оценка на работния борд зависи от редица фактори и условия, които могат да бъдат обособени в три основни групи: природни, минно–технически и организационни.

Оценката на устойчивостта на работен борд може да се извърши чрез използването на детерминирани или вероятности модели. В детерминираните математически модели всички величини участват с определена стойност, което не дава възможност да се отчете изменчивостта на свойствата на скалите. Оценката на степента на устойчивост на борда може да се извърши и с вероятностни модели (физически, математически и комбинирани), които имитират поведението на масива, опитвайки се да характеризират многообразието на физико-механичните свойства и условия на залягане на литоложките разновидности. Но и при тези модели, в най–добрия случай, се отразяват само някои от най–съществените страни на изследвания физичен процес, поради което получените резултати от оценката на устойчивостта могат да се считат за приблизителни. Тогава естествено възниква въпросът за надеждността на получените оценки и количествените им характеристики. Това, от своя страна, води до поставяне на друг въпрос – за търсене на комплексен подход за избор на подходящ метод за оценка на устойчивостта на работен борд и насоки за управление на устойчивото състояние на борда с цел рационалното използване на високопроизводителната изкопно-транспортно-насипищна механизация.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е разработване на комплексен подход за ***Избор на метод за оценка на устойчивостта на работен борд и възможност за технологично въздействие***.

За постигане на поставената цел са решени следните основни задачи:

1. Изследване и анализ на теоретичните, аналитичните и графо-аналитичните методи за оценка на устойчивостта на откосите
2. Разработване на актуална, съответстваща на съвременните изисквания класификация на методите за оценка на устойчивостта на откосите
3. Разработване на принципни решения при избора на метод за оценка на устойчивостта на откосите

4. Анализ на съвременните перспективни направления при оценката на устойчивостта на откосите с цел увеличаване на достоверността на резултатите от прилаганите изчислителни методи за оценка на устойчивостта на откосите

5. Разработване на методика за вземане на решения за управление на устойчивостта на работни бордове в открити рудници в условията на неопределеност на природната среда. Създаване на вероятностен модел и методика за оценка на надеждността на работни бордове.

6. Аprobация на методиката за комплексен подход за избор на метод за оценка на устойчивостта на откосите.

За решаване на поставените задачи са използвани познания от следните научни области: математичен анализ; числени методи; елементи от теорията на надеждността; вероятностно-статистически методи за обработка на експериментални данни; имитационно моделиране; теория на статистическите решения; компютърно моделиране; визуално програмиране и други.

Научна новост

1. Формулирани са теоретичните основи за оценка на устойчивостта на работен борд в открит рудник

2. Предложена е актуализирана класификация на методите за оценка на устойчивостта на откосите, въз основа на механо-математичен подход

3. Обосновано е приложението на пространствения (3D) анализ, въз основа на методите на граничното равновесие

4. Разгледани са перспективните методи за оценка на устойчивостта на откосите.

5. Обосновано е приложението на МКЕ за оценка на устойчивостта на работен борд в открит рудник (на примера на рудник „Трояново-север“, Мини „Марица-изток“ АД).

6. Предложени са принципни решения за избор на методи за оценка на устойчивостта на работен борд и възможност за технологично въздействие за предотвратяване на свлачищни явления.

Практическа приложимост

Предложената актуализирана класификация на методите за оценка на устойчивостта на откоси може да намери конкретно приложение за оценка и анализ на стабилитетното състояние на бордовете на открити рудници и кариери при разработването на различни видове находища на полезни изкопаеми.

Внедряването в практиката на съвременни изчислителни методики и тяхното комплексно използване, позволява съществено да се повиши достоверността на резултати при оценка на устойчивостта на бордовете, както и да се вземат необходимите решения за технологично въздействие за осигуряване на стабилитетно състояние и условия за безопасна работа на минната механизация и обслужващия персонал.

Разработените научно-методологични принципи за оценка на устойчивостта на откосите в откритите рудници и кариери могат да се използват за учебни, научно-изследователски и проектански цели.

Апробация

Резултатите от дисертационната работа са реализирани за оценка на устойчивостта на работен борд в рудник „Трояново-север“, „Мини Марица-изток“ АД.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в шест научни статии, от които три са самостоятелни. Другите три публикации са в съавторство, като в две от тях е на втора и в една от тях на трето място. Публикациите са представени както следва: 30th International Geological Congress (Beijing, China), 30, 4-14.08.1996; VIII Национална школа - семинар по реология, Българско реологично дружество, Централна лаборатория по физико-химическа механика – БАН, 8-11.10.1996; V Национална конференция с международно участие по открит добив на полезни изкопаеми: "Състояние и развитие на открития добив на полезни изкопаеми при пазарни условия" (Варна), Сб. доклади, 2-6.06.1998; Научна конференция на МГУ - "Технология и направление на минно-добивните работи", vol. 42, part II, Mining Engineering, Sofia, 1998; Научна конференция на МГУ - "Добив и преработка на минерални суровини", т. 59, св. II, София, 2016; Mining and Geological Today, International Symposium, 18-20.09.2017, Belgrade.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **225** страници, като включва увод, **пет** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **158** литературни източници, като **80** са на латиница и **78** . Работата включва общо **79** фигури и **16** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. СЪВРЕМЕННО ОПРЕДЕЛЕНИЕ НА ПОНЯТИЕТО УСТОЙЧИВОСТ НА ОТКОСИТЕ НА СЪПАЛАТА И БОРДОВЕТЕ НА ОТКРИТИТЕ РУДНИЦИ И МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА

1.1 Актуалност на въпроса, свързан с устойчивостта на откосите в открити рудници и кариери

Осигуряването на устойчивостта на работните и неработните бордове е една от най-важните предпоставки за оптималното развитие на минните работи.

Прегледът на световната литература и практика в областта на устойчивостта на откосите, показва че с най-висока степен на проява са реализираните вече свлачища в откритите рудници в САЩ, Китай, Канада, Мексико, Германия и други страни, особено при разработване на рудни находища в скални разновидности.

Едни от най-големите свлачища в световната минна практика са свързани с експлоатацията на откритите рудници в Източномаришкия възлищен басейн.

В резултат на задълбочени изследвания на отделни научни специалисти и интегрирани колективи (*Иванов, 1964; Иванов, Гечев, 1965; Стоева, 1968; Тодорова, 1970; Георгиев, 1972; Падуков, 1981; Пенчев и др., 1990 и много други*) в периода от появяването на първото свлачище до момента, става възможно да се изяснят:

- въпросите, свързани с условията за възникване на деформации по бордовете;
- предполагаемата схема на деформиране;
- достоверността на стойностите на физичните свойства и якостните показатели на литоложките разновидности, изграждащи масива;
- методите за оценка на устойчивостта на бордовете и оразмеряване на същите (*Георгиев и др., 1981*) и т.н.

Несъответствието между основните технологични параметри на рудника и конкретните инженерно-геоложки условия води до нарушаване устойчивостта на съпалата, бордовете и насипищата. Инженерно-геоложките условия определят стабилитетното състояние на масива и *избора на изчислителни схеми и методи за оценка на устойчивостта на откосите*, стойностите на показателите, участващи в изчисленията, и характера на заздравителните мероприятия.

Оптималният профил на борда на открития рудник трябва да отговаря на следните изисквания:

- да гарантира общата устойчивост на целия борд и да дава възможност за оптимално разполагане на минно-транспортните машини;
- да осигурява минимален обем откривни работи, безопасна работа и максимална производителност на багерите;
- да отговаря на съвременната технология за извършване на минни работи.

1.2 Теоретични постановки за оценка на устойчивост на откосите

Според конкретните условия, в минната практика се използват едновременно или поотделно два вида критерии за оценка на устойчивостта на изработките: коефициентът на устойчивост и критични деформации (условие за допустимите по големина и скорост деформации). Така например, за Източномаришките открити рудници е имало случаи, когато коефициентът на устойчивост е бил по-малък от 1, но не са наблюдавани свлачищни явления. Регистрираните сумарни деформации и критични скорости са били под определена стойност.

В различните литературни източници по инженерна геология и земна механика, специалистите използват различни термини за дефиниране на коефициента на устойчивост на откосите на стъпалата и бордовете на откритите рудници. По тази причина в дисертацията се използват следните символи и термини:

1) Коефициент на устойчивост (F)

$$F = \frac{\sum \tau_i \ell_i}{\sum G_i \sin \alpha_i}, \quad (1.1)$$

където: $\sum \tau_i \ell_i$ е сумата от съпротивителните сили в основната повърхнина на плъзгане;

$\sum G_i \sin \alpha_i$ - сумата от активните сили, които се определят от теглото на тялото на свлачищния масив и наклона на основната повърхнина на плъзгане.

2) За определяне на изчислителните якостни характеристики при оценката на устойчивостта на откосите се прилага коефициентът на сигурност

$$F_c = \frac{\tau_i}{\tau_c}, \quad (1.2)$$

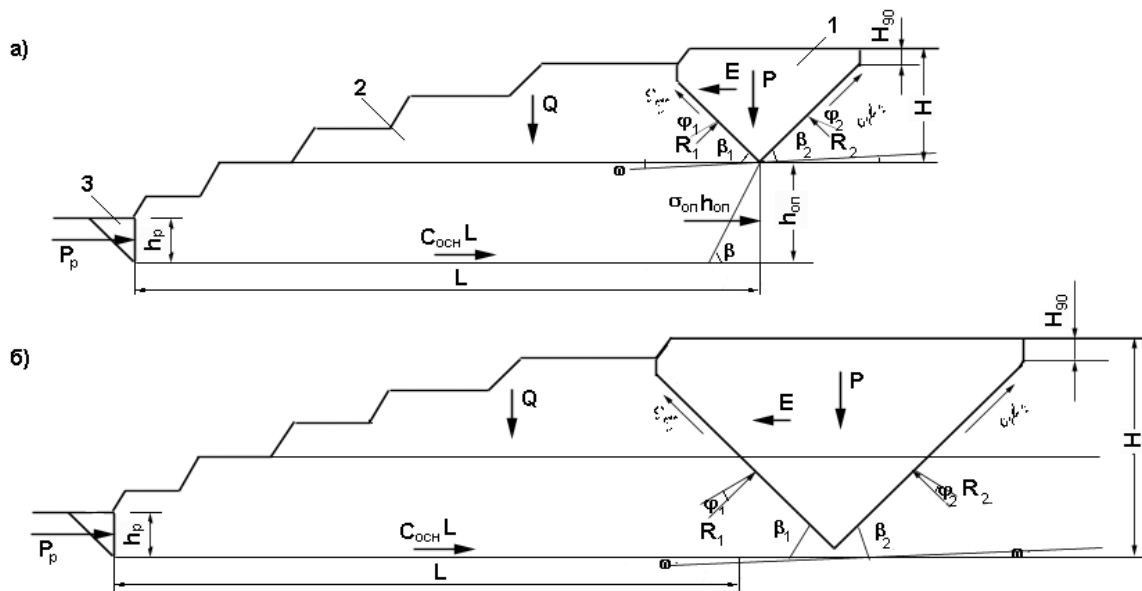
където: F_c е емпиричен коефициент, с който се коригират нормативните стойности на съпротивленията на срязване τ_i (съответно φ_i и c_i), получени от максималните стойности на девиаторните напрежения $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$, определени в триаксиални условия, или срязващите напрежения τ_{\max} , определени при плоскостно срязване, и се определят т.нар. „изчислени показатели“ (τ_c).

3) Особенности на коефициента на устойчивост и коефициента на сигурност в откритите рудници

Всички инженерни съоръжения се изчисляват с определен запас на якост, зависещ от условията на експлоатиране на съоръженията. Устойчивостта на откосите и бордовете също се изчислява с някакъв запас на якост, изразен с коефициента на сигурност (запас) F_c .

За откритите рудници в Източномаришкия басейн, стабилитетното състояние на бордовете може да бъде квалифицирано като устойчиво, гранично равновесие и неустойчиво (Заславский, 1986).

От дългогодишните визуални и инструментални наблюдения на свлачищните явления в Източномаришките открити рудници, като най-подходяща за конкретните условия е приета следната изчислителна схема: призма на активен земен натиск, централен блок с възможност за хоризонтално преместване и призма на пасивен земен натиск (фиг. 1.7).



Фиг.1.7. Схема за определяне на устойчивостта по метода на призмата на активен земен натиск

а) при връх на призмата на активен земен натиск до възглищния пласт; б) при връх на призмата на активен земен натиск в междупластието; 1 – призма на активен земен натиск; 2 – централен блок; 3 – призма на пасивен земен натиск

Съгласно тази изчислителна схема, коефициентът на устойчивост се определя по формулата:

$$F = \frac{c_o L + Q \cos \omega \operatorname{tg} \varphi_o + P_p + Q \sin(-\omega)}{E + Q \sin(+\omega)}, \quad (1.10)$$

където: E е тласкащата сила на призмата на активен земен натиск по основата на централния блок, N ;

P_p - пасивен натиск на скалите в призмата на упора, N ;

L - дължина на основата на централния блок, m ;

Q - тегло на централния блок, N ;

c_o - кохезия по основата на централния блок, Pa ;

φ_o - ъгъл на вътрешно триене по плъзгателната повърхнина в основата на централния блок, градуси;

ω - ъгъл на залягане на скалите, градуси. Знакът е положителен (+), когато наклонът е към рудника, и отрицателен (-), когато наклонът е към масива.

По този аналитичен модел се извършва проверката на устойчивостта на бордовете (работни) в Източномаришките открити рудници при годишното планиране и текущия контрол.

Целесъобразността от приложението на стохастичния подход следва и от двата основни недостатъка на детерминирания подход, а именно:

- не се отчита вероятностният характер на използваната входна информация и получавания краен резултат;
- не може да се даде количествена оценка на устойчивостта на бордовете за определен период от време.

1.3 Анализ на приложимите методи за оценка на устойчивостта на откосите

В последните години е постигнат голям напредък при анализа на устойчивостта на откоси. Детерминираният метод са графичен метод, теория за граничното равновесие, числени методи за анализ и комбинирани методи.

1.3.1 Методи, основаващи се на инженерно-геоложките условия на масива

Методите се основават на инженерно-геоложките условия на масива като се изучават основните фактори, които влияят върху устойчивостта на откоса и начините на възможните механизми на деформиране, причините за деформирането на геоложкото тяло и реологията на масива.

При сложни геоложки условия на откосите на рудниците този метод е от изключителна важност за определяне модела и механизма на свлачището (*Sun Yu-ke, et al., 1965; 1983*). Той поставя основите за количествено изследване на устойчивостта на откосите.

1.3.2 Метод за анализ на граничното равновесие

Този метод първоначално е предложен от шведския учен Peterson през 1916 г. и е известен като Метод на кръговоцилиндричната повърхнина. След това методът е доразвит от Fellenius, Taylor Bishop, Джанбу, Morgenstern и Prais, Spencer, Sarma (1979), Чен Джую (1983) и много други учени. Понастоящем методът на граничното равновесие е разработен от двумерен (2D) до тримерен (3D). Китайските учени Чен Джую (2001), Джън Хун (2007), имат значим принос в развитието на метода при теоретичните изчисления.

1.3.3 Метод на граничния анализ

Методът на граничния анализ разглежда свлачищното тяло като идеален пластичен материал. Когато свлачищното тяло е в гранично състояние, сумарната работа на теглото на свлачищното тяло и външния товар ще бъде равна на работата на съпротивителните сили по повърхността на плъзгане.

1.3.4 Числени методи за анализ

С развитието и популяризирането на компютрите се развиват бързо и числените методи: методи на крайните разлики, методи на крайните елементи, методи на граничните елементи, метод без елементи, метод без мрежа (meshless method), метод на дискретните елементи, метод на прекъснатата деформация, метод на Лагранж (Бърза интерполация), колекторен метод (manifold method). Методът на дискретните елементи Cundallpa (1971) и методът FLAC – 3D (Бърз метод на Лагранж) Kou Xiao-

dong (2001) са два подхода, предложени от американския учен Кендал (Cundall). Те имат изключително широк спектър на приложение и перспективи при решаването на дискретни и дисконтинуитетни проблеми, а така също и проблеми с големи деформации Ma Feng-hai (1999). Недостатък на методите е, че нямат строго теоретична основа. Методът на прекъснатата деформация Hang (2008), колекторният метод (manifold) Zhang Guo-xin (2007), PFC (Particle flow code) Zheng Zhi-neng (2008), RFPA (Анализ на процеса на реалистичната грешка) Li Lian-chong (2006) и други числени методи са широко използвани при анализа на устойчивостта на откоси. Те стимулират развитието на познанията в тази област.

1.3.5 Вероятностни методи

Теорията на вероятностите се прилага в Slope Engineering (в инженеринга на откоси) от края на 1970 г. Zhu Yu-xue (1993), като много учени са дали своя съществен принос Liu Han-dong (1998), Su Yong-hua, He Man-chao (2007), Yao Yao-wu, Cheng Dong-wei (1994), Zhu Yu-xue (1993) и Wang Jia-chen (1996) публикуват монография, в която доказват, че теорията на метода на вероятностния анализ на откоси навлиза в нов етап на развитие.

Вероятностите методи имат следните разновидности, Zhang She-rong (1999), Zhao Shou-gang (2006) и Li K S, Lumb P. (1987):

1. Метод Монте-Карло (симулиране).
2. Метод на моментите от втори ред, известен още като метод на Rosenblueth moment estimation method.
3. Метод на статистическите моменти.
4. Стохастичен метод на крайните елементи.

1.4 Съвременни възгледи за оценка на инженерните решения за осигуряване на устойчивостта на откосите

При изучаване на причинно-следствената връзка между различните процеси, протичащи в масива под влияние на минните работи, основната количествена информация се получава по пътя на експеримента. Изменяйки в определени граници едно или няколко явления-причини (фактори), се създава възможност да се изучи поведението на наблюдавания обект, т.е. да се установи явлението-следствие. В тази връзка трябва да се отбележи, че състоянието на една сложна система, каквато е откритият рудник и в частност устойчивостта на бордовете му, се определя от едновременното действие на множество фактори. В математическите модели, които описват поведението на системата, те участвуват с числените си характеристики. На практика е трудно да се определи до каква степен тези характеристики отразяват влиянието на определен фактор върху състоянието на системата, тъй като всеки от тях е под съвкупното (общото, едновременното) влияние на останалите. Наличните странични причини (наричани в кибернетиката “шумове”), които не могат да бъдат отстранени при изследванията, влизат в числените характеристики на основните изучавани фактори. В резултат на случайните им съчетания (комбинации), колкото и да са незначителни, стойностите на интересуващите ни числени характеристики от даден експеримент са различни при всеки проведен опит.

Едновременното взаимодействие на посочените фактори, които са променливи величини, определя различни стойности на съпротивлението на срязване, дори в една и съща разновидност (Каган, 1985).

За получаване на надеждни и достоверни характеристики на глините трябва да се извършат многобройни изследвания на техните свойства в лабораторни и полеви условия.

Вероятностните методи и модели са удобни предимно като средство за изследване и прогнозиране (Кисляков, 1981), а не за извършване на текущи инженерни изчисления.

Публикувани са много разработки, при които вероятностно-статистическият подход е основен, засягащ различни аспекти на фундирането, геологията, инженерната геология и др. дисциплини, които имат отношение към оценката на устойчивостта на откритите минни изработки.

Редица автори, като Туринцев (1982), Moeis (1983), Zhu Yu-xue (1993) и много други, свързват вероятностният подход при изчисляването на устойчивостта на откосите на стъпалата и бордовете с използването на нови средства за наблюдение на деформациите, с извършване на противодеформационни мероприятия със значителен икономически ефект от намаляване на обемите подлежащи на изземване, със създаването на икономически модел "изгода-разходи", с постигането на оптимална конфигурация на рудничното поле и т.н.

Във основа на направената литературна справка е формулирана основната цел на дисертационния труд, както и задачите, които трябва да се решат за нейното постигане.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТВАНЕ НА АКТУАЛНА, СЪОТВЕТСТВАЩА НА СЪВРЕМЕННИТЕ ИЗИСКВАНИЯ КЛАСИФИКАЦИЯ НА МЕТОДИТЕ ЗА ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА ОТКОСИТЕ

2.1 Обосноваване на критерии за актуализиране на класификациите на методите за оценка на устойчивостта на откоси

Класификациите на методите за оценка на устойчивостта на откосите се развиват успоредно с изчислителните схеми и теоретични постановки. Понастоящем съществуват над 200 подхода за оценка на устойчивостта на откосите. Изборът на един или друг метод първоначално се определя от математическия апарат за решаване на задачата, типа на свлачищния процес и механизма на възможното преместване на свлачищната маса. Тяхното многообразие и непрекъснато усъвършенстване предизвиква необходимост от актуализиране на съществуващите класификации.

Различието в съществуващите класификации е основно в използваните базиси.

Един от ключовите въпроси при анализа на устойчивостта на откосите е формата и пространственото положение на най-опасната плъзгателна повърхнина.

В класификацията на Дёмин (1973) изчислителните методи се разделят по няколко признака:

- по похода на решаване на задачата (емпиричен и теоретичен);
- по използваните изчислителни характеристики (методи от свлачищни сили или деформация);
- по начина на решаване на задачите (аналитични, графични или графо-аналитични);
- по начина на разглеждане на плъзгателната повърхнина (или се задава повърхнината или се търси).

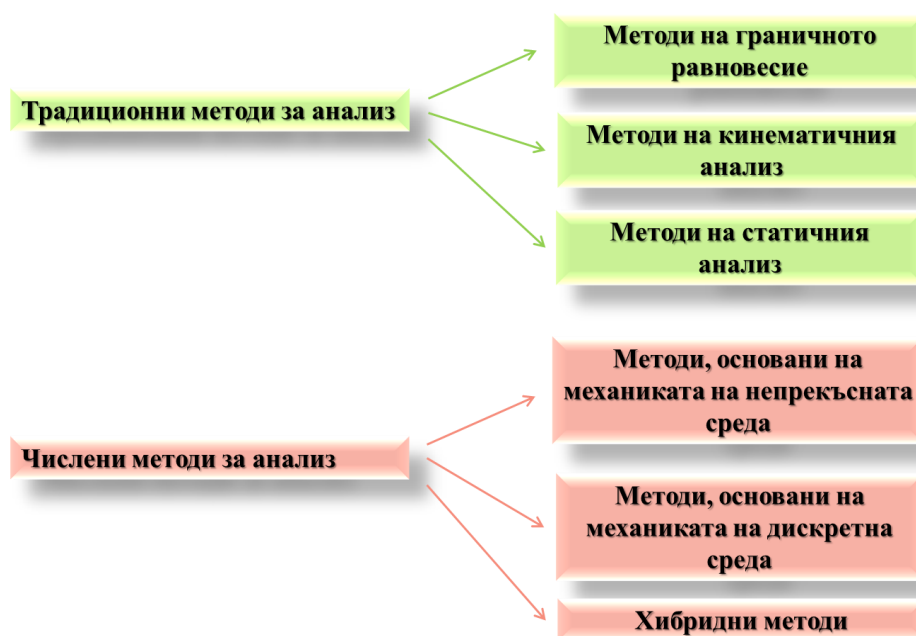
Приведените принципи обаче не съответстват на понятието класификационен признак.

Класификацията на Певзнер (1978) е структурирана стъпаловидно и включва класове методи – група методи – основни методи – изчислителни методи.

Цитович и Тер-Мартirosян (1981), смятат, че определянето на устойчивостта на откосите може да се извърши както с приблизително методи така и с точни методи от механиката на скалите.

Освен посочените класификации следва да се отбележат и тези на Хуан (1988), Abramson, Lee, Sharma и Boyce (2002), Gitirana (2005), Coggan, Stead, Eyre (1998).

На фигура 2.1 е представен вариант на класификацията на методите за оценка на устойчивостта според Coggan (1998), а на фигура 2.2 класификацията на Gitirana (2005).



Фиг.2.1 Класификация на методите за оценка на устойчивостта на откоси според Coggan (1998)

Методи на граничното равновесие

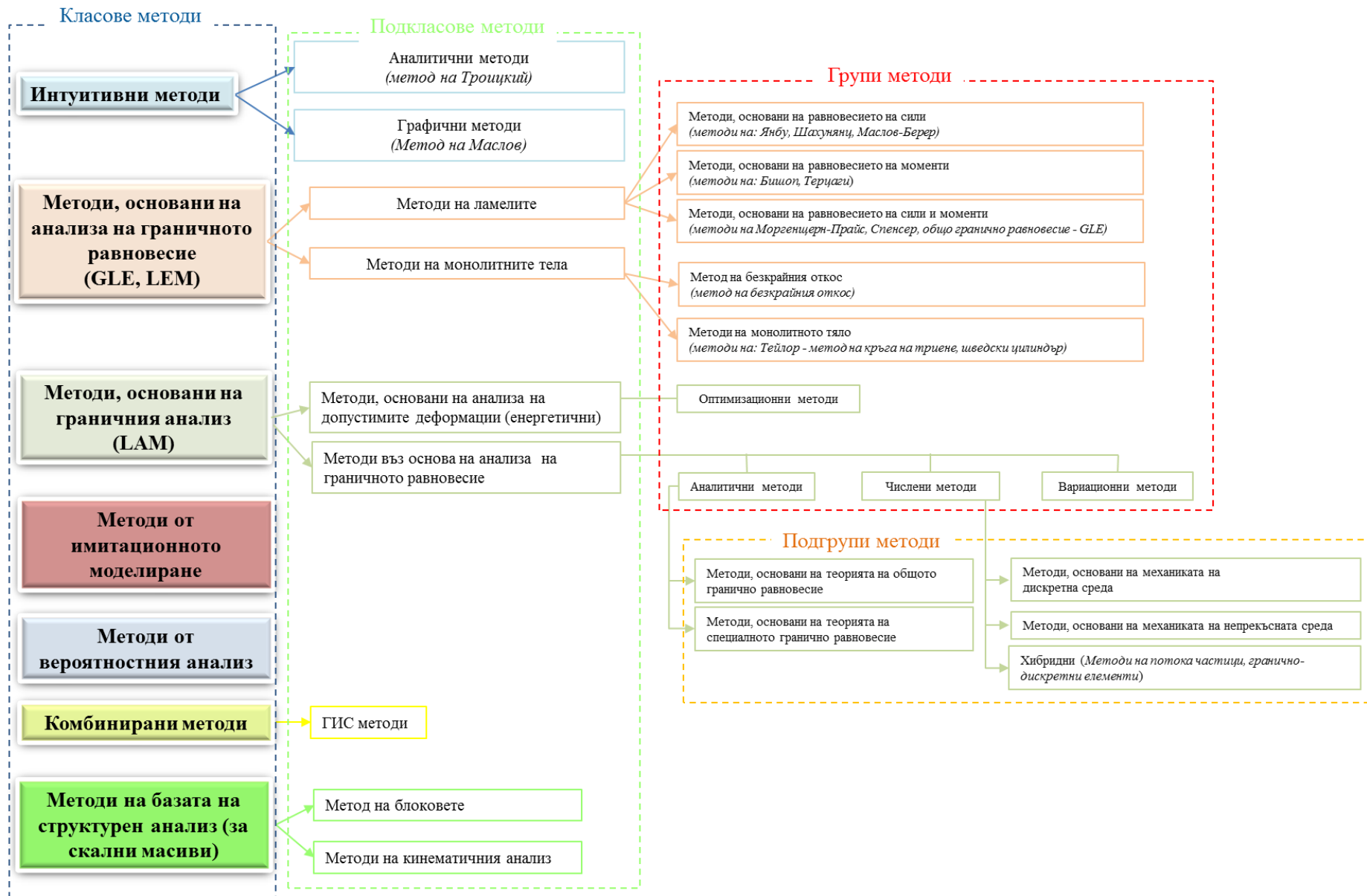


Фиг.2.2 Класификация на методите за оценка на устойчивостта на откоси според Gitirana (2005)

Във връзка с интензивното развитие на подходите за оценка на устойчивостта на откосите, по-ранно използваните критерии за класификация към момента не могат да бъдат приложени към голям брой методи. Например, формата на плъзгателната повърхнина е неприемлива за разделяна на класовете при числен анализ на методите на крайните разлики и крайните елементи.

В настоящия труд е предложена обобщена и допълнена класификация на методите за оценка на устойчивостта на откосите, която се основава на механо-математическите подходи за решаване на задачата. В съответствие с нея, изчислителните методи за оценка на устойчивостта условно могат да се разделят на няколко принципни групи: *интуитивни*: основани на анализа на граничното равновесие; основани на граничния анализ; основани на структурния анализ; *методи на вероятностния анализ*; *комбинирани методи*, в това число с използването на Географска информационна система (ГИС) - технологии (фиг.2.3).

Следва да се отбележи, че групите изчислителните методи постоянно се развиват, възникват нови подходи за решаването на задачите за оценка на устойчивостта. Заедно с усъвършенстването на изчислителните методи е необходимо да се доразвива и тяхната класификация.



Фиг.2.3 Класификация на методите за оценка на устойчивостта на откоси въз основа на механо-математическия подход

2.2. Интуитивни методи

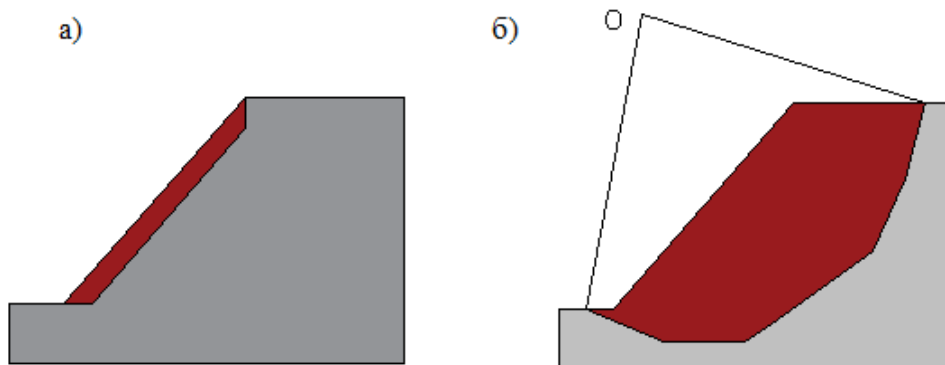
Към групата на интуитивните методи се отнасят всички приблизителни аналитични и графически методи. Най-известният в разглежданата група методи е методът на Маслов (1982). Един от недостатъците на метода е, че наклонът на профила на гранично равновесие зависи от броя на слоевете, на които се разделя стъпалото. Този недостатък е отстранен в метода, предложен от Троицкий (Фоменко, 2011).

2.3 Група методи, основани на анализа на граничното равновесие

Това е най-голямата група методи, основани на анализа на гранично равновесие (Limit Equilibrium Methods - LEM). В нея могат да се отделят две основни подгрупи - метод на монолитно тяло и метод на отрезите (ламели).

2.3.1. Подгрупа на методите на монолитното тяло

Към тази група се отнасят методите на безкрайния откос и методите на монолитното тяло (фиг.2.5).



Фиг.2.5 Схема на методите на монолитното тяло:

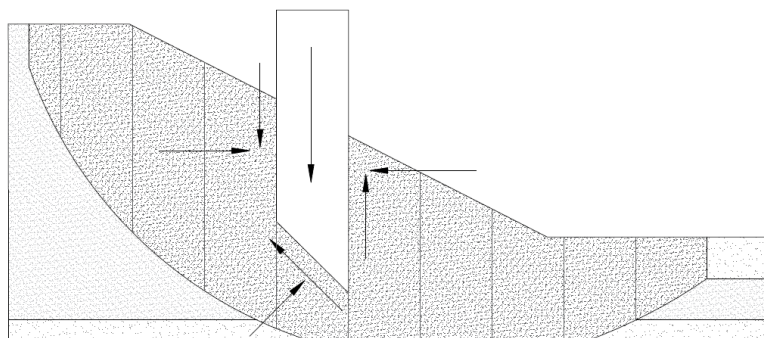
а) метод на безкрайния откос; б) метод на монолитното тяло

В съответствие с това могат да се използват два метода за оценка на устойчивостта на откоси, в основата на които лежат моделите на твърдо отсичане на масива:

- 1) Метод на кръговоцилиндричната повърхнина на плъзгане и
- 2) Метод на равнинната повърхнина на плъзгане.

2.3.2. Подгрупа методи на отрезите (ламелите).

През последните десетилетия са разработени редица изчислителни методи за оценка на устойчивостта на откоси чрез разделяне на свлачищното тяло на вертикални ивици (ламели). Разликите между методите се изразяват в това, какви допускания са приети, как се извършва отчитането на силите на границата между ламелите и как се задава взаимното положение между движещите и перпендикулярните сили на границата на ламелите (фиг.2.7).



Фиг.2.7 Система от сили, действащи на произволна ламела от призмата на обрушване

В таблица 2.1 са посочени най-известните в световната практика изчислителни методи за оценка на устойчивостта на откоси, основани на метода на ламелите, с посочени условия за статическо равновесие, които те удовлетворяват.

Таблица 2.1

Методи за оценка на устойчивостта на откоси и условия за статическо равновесие, които те удовлетворяват

Изчислителни методи	Равновесие на сили		Равновесие на моменти
	Вертикални	Хоризонтални	
Метод на Фелениус	Да	Не	Да
Метод на Бишоп	Да	Не	Да
Метод на Янбу	Да	Да	Не
Метод на Спенсър	Да	Да	Да
Метод на Моргенщерн-Прайс	Да	Да	Да*
Метод на общо гранично равновесие	Да	Да	Да
Метод на Асоциацията на инженерите	Да	Да	Не
Метод на Льов и Карафиат	Да	Да	Не
Обобщен метод на Янбу	Да	Да	Не
Метод на Сарма	Да	Да	Да

*За изчисляване на движещите сили на границата между отделните ламели се използва равновесие на моменти за всяка ламела.

Освен посочените методи, широко приложение намира и метода на Маслов-Берер (Маслов, 1977), който също се отнася към разглеждания подтип.

Към подтипа методи с наклонени сили се отнасят метода на Асоциацията на инженерите (Army Corps of Engineers, 1970), Льов и Карафиат (Lowe and Karafiath, 1960), а също и широко се използва при пътното строителство метода на срязващите сили (метод на Шахунянц, метод на наклонените ламели и др.).

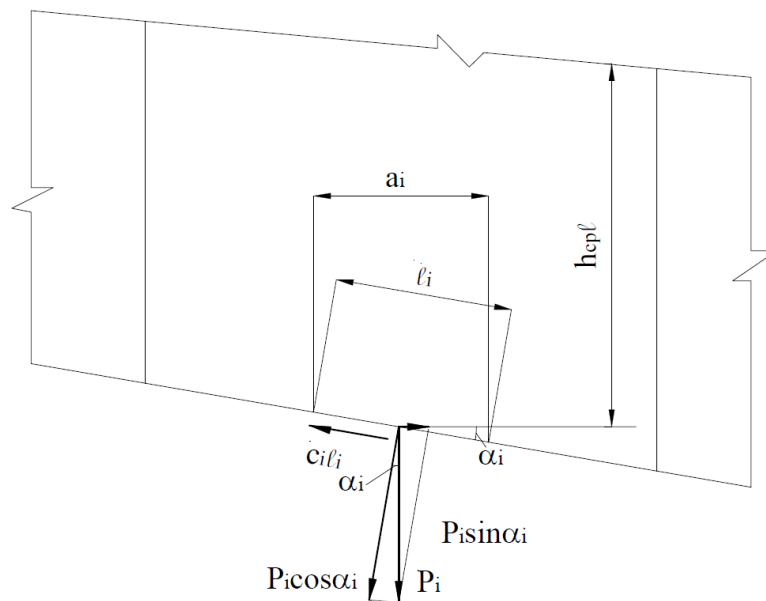
2.4 Група методи, основани на граничния анализ

През последните години направлението получава активно развитие в световната практика за оценка на устойчивостта на откоси под общото наименование LAM (Limit analysis method). Основната идея, заложена в LAM се изразява в това, че

литоложките разновидности, изграждащи откоса се разглеждат като идеално пластично тяло, удовлетворяващи условието на свързаност на пластичен поток.

2.4.1. Подгрупа методи, основани на анализа на допустимите деформации

Метод на Соловев. През 1962 г. Соловев предлага при оценката на устойчивостта на откоси да се използва същата хипотеза, както приемат Герсеванов и Терцаги, за принципа на преместване (Гинзбург, 1986). Плъзгателната повърхнина при това предположение, трябва да се разглежда като повърхнина на границата (контакта) между призмата на обрушване и долулежащите скали, по която върху призмата действат едностранни сили от кохезията и външни срязващи сили и сили от триенето (фиг.2.11).



Фиг.2.11 Изчислителна схема по метода на Соловев

Коефициентът на устойчивост на откоса според Соловев представлява отношението на работата на задържащите и свличащите сили при преместване, които за всички ламели имат една и съща хоризонтална съставляваща u_o . Възможните премествания S , които се допускат при свързана система, ще възникнат по дължината на плъзгателната повърхнина и за всяка ламела ще бъдат равни:

$$S = \frac{u_o}{\cos \alpha_i} \quad (2.17)$$

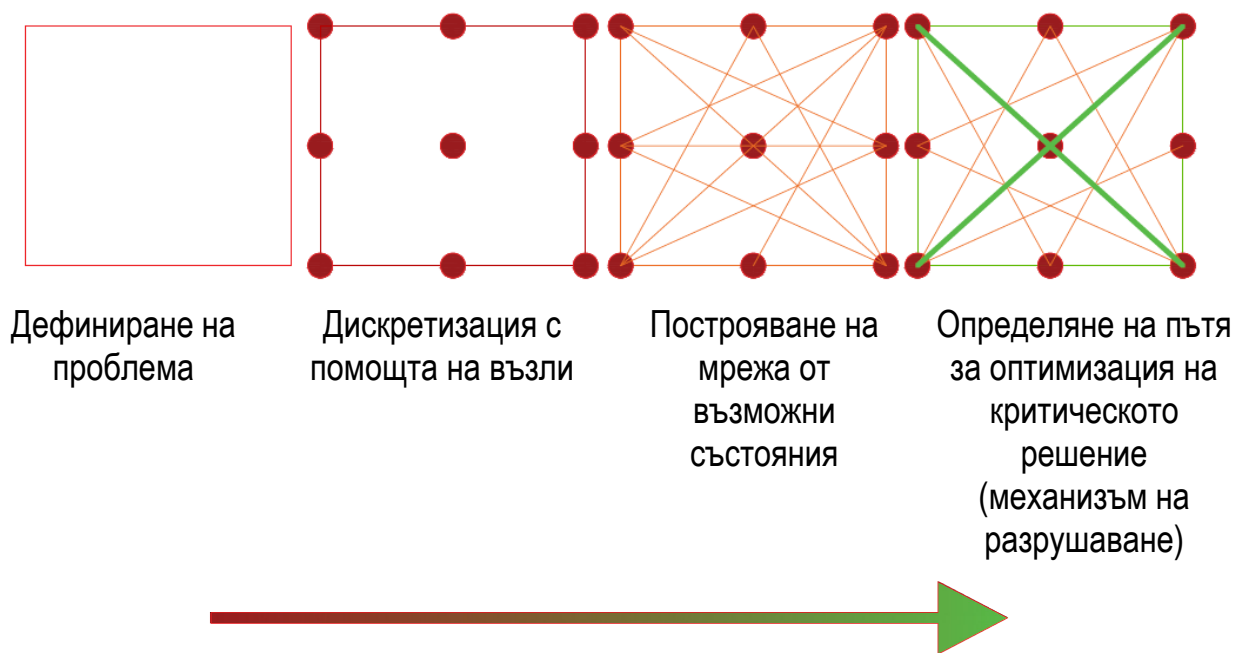
Едно от предимствата на метода за приложение на принципа на възможните премествания е, че при разглежданата призма на възможното обрушване не се изисква отчитане на работата на вътрешните сили върху относителните премествания на отделните елементи.

2.4.2 Методи на дискретна оптимизация

Решаването на задачата на дискретната оптимизация се основава на анализа на различни варианти.

Методът на дискретната оптимизация DLO (Discontinuity layout optimization) за анализ на устойчивостта на откоси е разработен в Университета в Шефилд и

първоначално е описан от Смит и Гилберт (*Smith, Gilbert, 2007*). Алгоритмът на дискретната оптимизация се състои от няколко етапа, представени на фиг.2.12.



Фиг.2.12 Алгоритъм за изпълнение на анализа чрез метода DLO

Перспективно направление при решаването на задачата за дискретна оптимизация е използването на методите, основани на невронните мрежи.

2.4.3 Подгрупа методи, основани на анализа на допустимите напрежения

Методите от посочената подгрупа могат да бъдат разделени на аналитични и числени.

Аналитичните методи са разработени въз основа на строгата теория за гранично равновесие и решаването на общата задача от статиката за сипеца среда.

Използването на числителни методи съществено увеличава възможностите на математическото моделиране. Те могат да бъдат разделени на методи, основани на механиката на непрекъснатата среда и методи, основани на механиката на дискретна среда. Допълнително могат да бъдат включени хибридни методи, които използват различни подходи, например съчетаване на метода на гранично равновесие и крайните елементи, с цел максималното използване на техните предимства.

Метод на граничните елементи

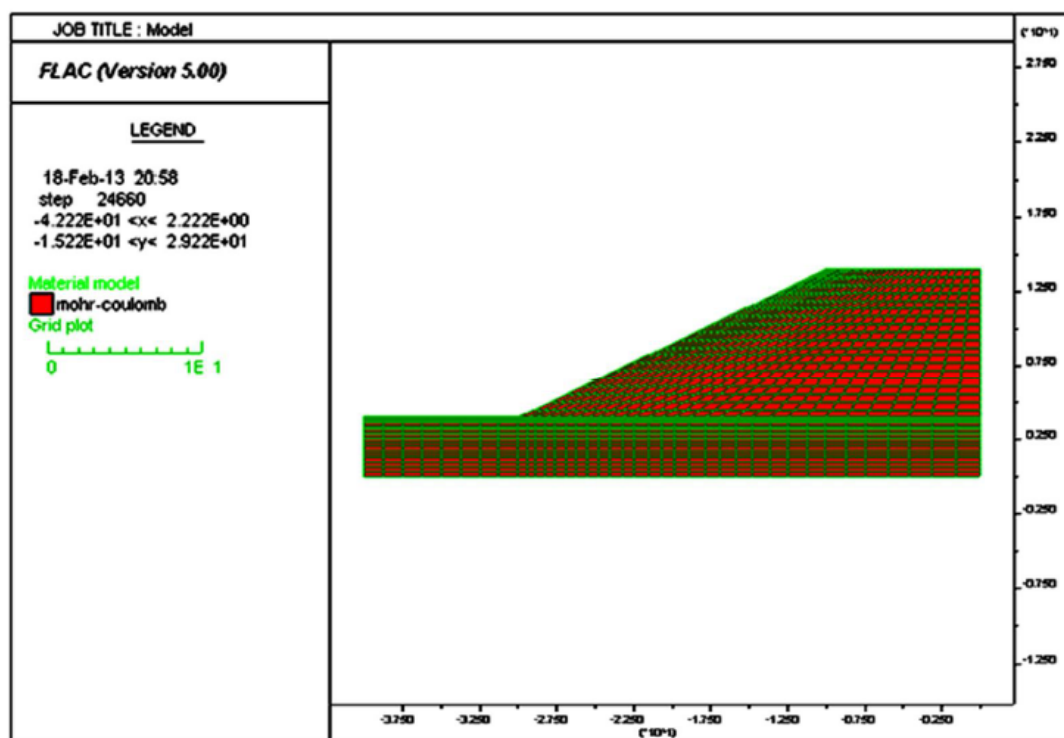
Основната идея на метода е зависимостта между стойностите на търсените функции в разглежданата област и стойностите на границата. Тази зависимост се получава при преминаване от диференциални уравнения към производните от тях интегрални съотношения. Последователното прилагане на тази идея води до замяна на диференциалните уравнения, изискващи намиране на неизвестни функции във всяка област, с еквивалентни интегрални уравнения, които като неизвестни включват само тези функции, намиращи се на границата на областта. Тези уравнения се наричат гранични интегрални уравнения. Затова методът на граничните елементи, който всъщност представлява числена реализация на решението на тези уравнения, често се нарича *метод на граничните интегрални уравнения*.

Метод на крайните разлики

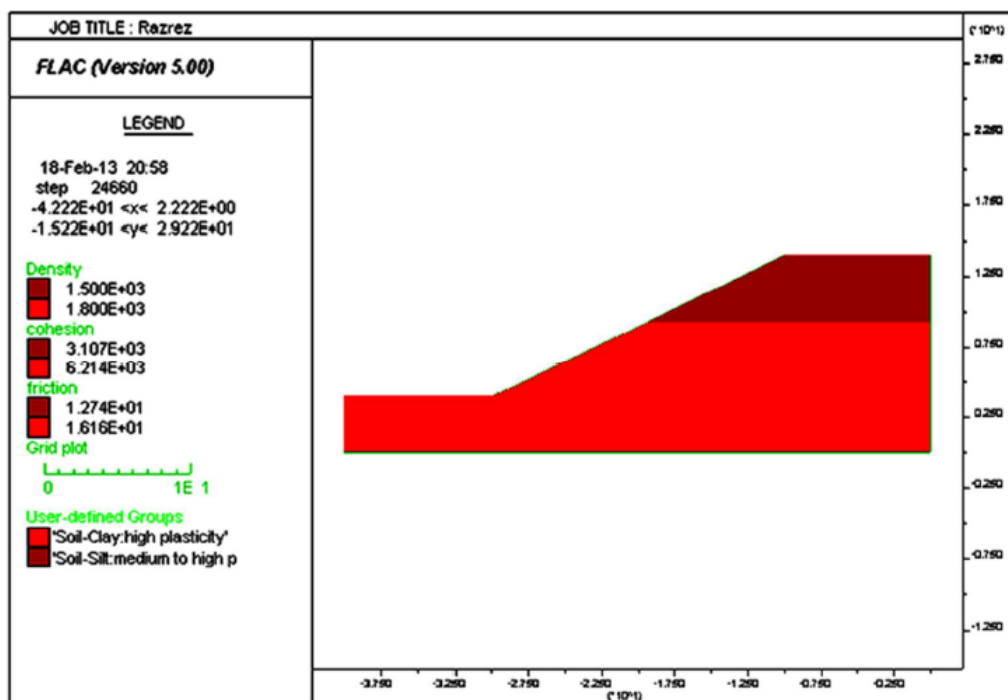
Методът на крайните разлики (МКР) е един от най-универсалните числени методи. Той се основава на това, че непрекъснатите разпределения на параметрите, характеризиращи процеса са съвкупност от дискретни стойности във фиксирани точки - възли. В резултат на производните в основните уравнения и гранични условия с достатъчна точност могат да се заменят (апроксимират) съотношения на крайни разлики, съдържащи стойности на мрежова функция в няколко възли от мрежата; при това крайната цел на задачата е да се заменят изходните диференциални уравнения със система алгебрични уравнения.

През последните години голям брой изследвания в областта на геодинамичните процеси и явления, са извършени въз основа на метода на крайните разлики и неговото реализиране, например с компютърната програма Flac (*Itasca, 2001*).

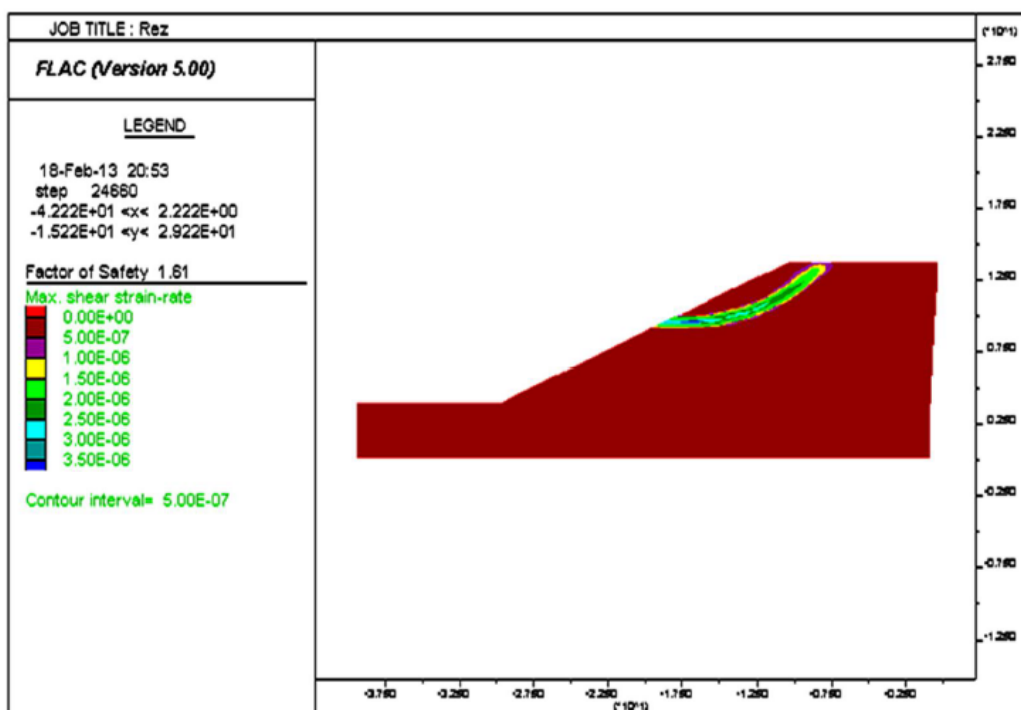
За пример може да се разгледа приложението на метода на крайните разлики (FLAC-Slope) за оценка на устойчивостта на тестов модел на откос, предложен от Frenlund и Krahn (*1981*). На фигура 2.15 и фигура 2.16 са представени мрежата на крайните разлики и геомеханичния модел с параметри физико-механичните свойства на скалния масив, използвани в изчисленията.



Фиг.2.15 Мрежа на крайните разлики на тестов модел на изчислителен профил



Фиг.2.16 Геомеханичен модел на изчислителния профил на откоса



Фиг.2.17 Резултати от моделирането с метода на крайните разлики (цветната скала показва степента на максималните деформации)

Анализът на резултатите от моделирането на устойчивостта на тестовия откос с метода на крайните разлики ($F=1,61$) с резултатите, получени по метода на граничното равновесие и метода на дискретната оптимизация, позволява да се направи извода, че те се отличават с 5%. Забележителен е фактът, че определеното положение на зоната на плъзгателната повърхнина посредством моделирането, съвпада с резултатите получени при метода на дискретната оптимизация (виж фиг.2.13).

Метод на крайните елементи

Методът на крайните елементи е числен метод за решаване на задачи свързани с анализа на физичните явления в тела — непрекъснати среди (твърди тела, течности и газове) с най-обща и често сложна конфигурация. Неговата реализация е възможна със специализирани софтуерни продукти като ANSYS, ASKA, SAP, NASTRAN, ABAQUS, LSDYNA, ADINA, ALGOR, COSMOS и др.

Конкретното приложение на МКЕ за оценка на устойчивостта на откоси е въз основа на вариационните принципи в теорията на еластичността. Основните предположения в теорията на еластичността са свързани с:

- малки премествания;
- малки завъртания;
- идеално еластичен материал.

Методи, основани на модела на дискретна (несвързана) среда

Към разглеждания подтип методи се отнасят методът за анализ на прекъснатите деформации DDA (Discontinuous Deformation Analysis), Методи на дискретните елементи DEM (Discrete element method), метод на отделните елементи (distinct element method) и метод на клетъчните автомати.

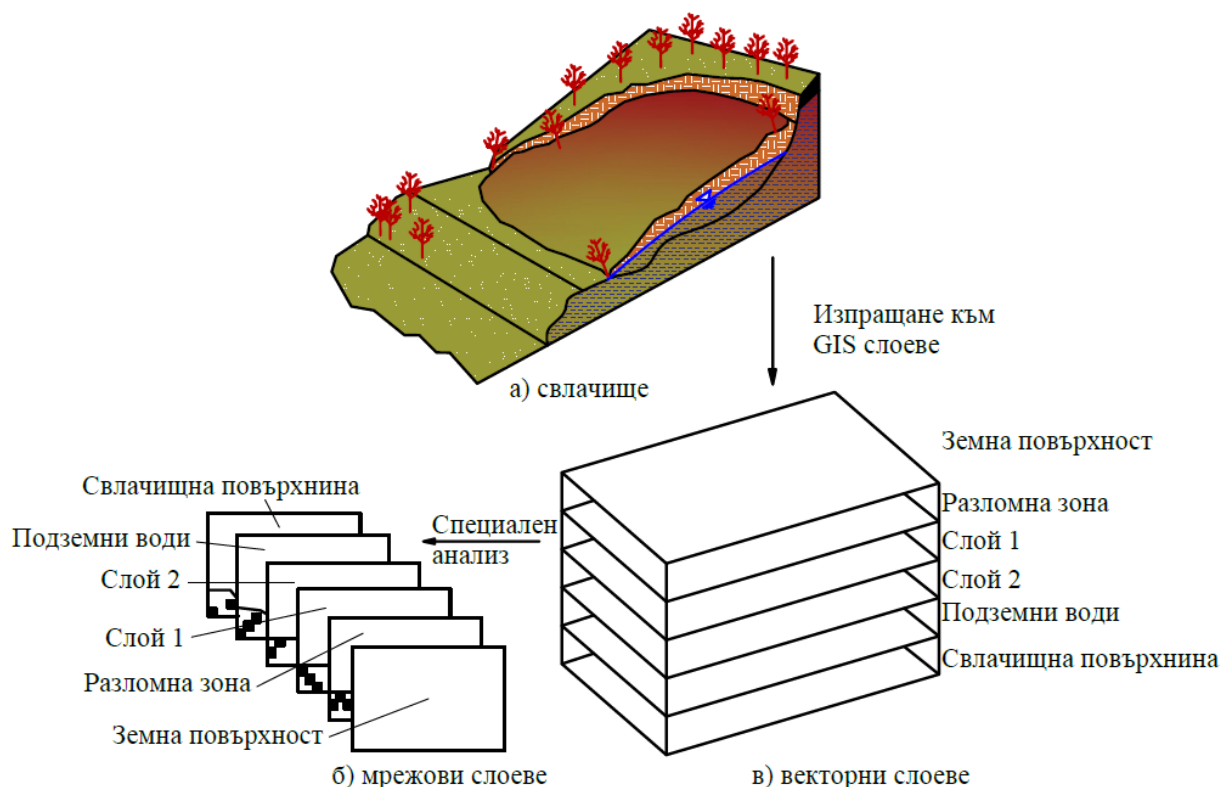
Хибридни методи. Съчетаването на методите на гранично равновесие и методите на крайните елементи позволява да се преодолеят недостатъците на методите на граничното равновесие. Kulhawi (1969) разработва подход, при който обединява методите на гранично равновесие с методите на крайните елементи и го нарича „метод на разширено гранично равновесие“.

2.5 Група вероятностни методи за анализ

Във връзка с това, че съпротивлението на скалите на срязване варира в широки граници, през последните няколко години вероятностният метод започва да развива интензивно (Хуан, 1988). Основният му недостатък е, че за оценката на отклонението в стойностите на якостта на срязване е необходим голям брой изпитвания. Вероятността за развитие на свлачищен процес може да се установи само тогава, когато е оценена или зададена изменчивостта на свойствата на скалите.

2.6 Група комбинирани методи с използване на ГИС

Един от най-разпространените инструменти за оценка на свлачищна опасност е въз основа на ГИС технологиите. Подходът е реализиран от Xie Mowen и др. (2011) и се базира на триизмерен мрежови модел. Принципната схема на изпълнение е представена на фигура 2.26.



Фиг.2.26 Принципна схема за оценка на устойчивостта на откос с използване на ГИС-технологии

Разгледаният подход използва класическия модел, при който долната елипсоидна част от свлачището представлява плъзгателната повърхнина. Триизмерната критична плъзгателна повърхнина се определя чрез минимизация на коефициента на якост по метода на Монте-Карло. Елементите на откоса при моделиране се определят от цифров модел на релефа. Всички изчисления се извършват със специализиран софтуерен продукт 3DSlopeGIS, получаващ всички входни данни непосредствено от ГИС и във формат ГИС. Входните резултантни данни също така се въвеждат във формат ГИС, и непосредствено в ГИС.

2.7 Група геолого-структурни методи

Обрушването на скални и полускални откоси произтича по други принципи, а не по развитието на свлачищни процеси в дисперсни почви. Основна роля играят системите пукнатини. Могат да се отличат следните случаи (Дьомин, 1973):

- слоят или пукнатината се намират откъм страната на скалния откос под ъгъл по-малък от ъгъла на вътрешно триене на скалите; критическата стойност на наклона на откоса ще бъде 90° ;
- слоят или пукнатината западат подъ ъгъл по-голям от ъгъла на вътрешно триене на скалите; критическата стойност на наклона на откоса ще бъде равен на ъгъла на вътрешно триене на скалите; при това ако по слоя или пукнатината съпротивлението на срязване се определя не само от триенето, но и от кохезията, тогава откосът може да бъде вертикален до определена височина. Устойчивостта на вертикалната част от откоса в този случай се определя по следния начин:

$$H \leq \frac{c_i}{\gamma_r \cos \alpha (\sin \alpha - \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi_i)}, \quad (2.66)$$

където: c_i е кохезията между слоевете (пукнатините);

γ_r - обемното тегло на скалите;

α - ъгълът на западане на слоевете (пукнатините);

φ_i - ъгълът на вътрешно триене между слоевете (пукнатините).

Превишаването на тази височина ще доведе до загуба на устойчивост на откоса.

В общия случай, анализът на устойчивостта на скални и полускални откоси включва два етапа. През първия етап е необходимо да се анализира структурата на скалния масив, с цел определяне на ориентацията на пукнатините, която би могла да доведе до неговото обрушаване. Това се постига чрез кинематичния анализ. Ако от резултати му се установи възможност за обрушване, то през втория етап се извършват изчисления за устойчивостта.

2.8 3D-модели за оценка на устойчивостта на откоси

Създаването на 3D-модели е широко разпространен метод, както при решаването на редица практически инженерни задачи, например при численото моделиране на напрегнатото деформирано състояние на масива, така и за решаването на широк спектър екологични и хидрогеоложки задачи.

Най-известните методи за пространствено моделиране на устойчивостта на откосите са:

Метод на Анагности (Anagnosti). Методът представлява допълнение на двумерния метод на Моргенщерн-Прайс чрез въвеждането на допълнителни уравнения за равновесие на тънки вертикални пластини.

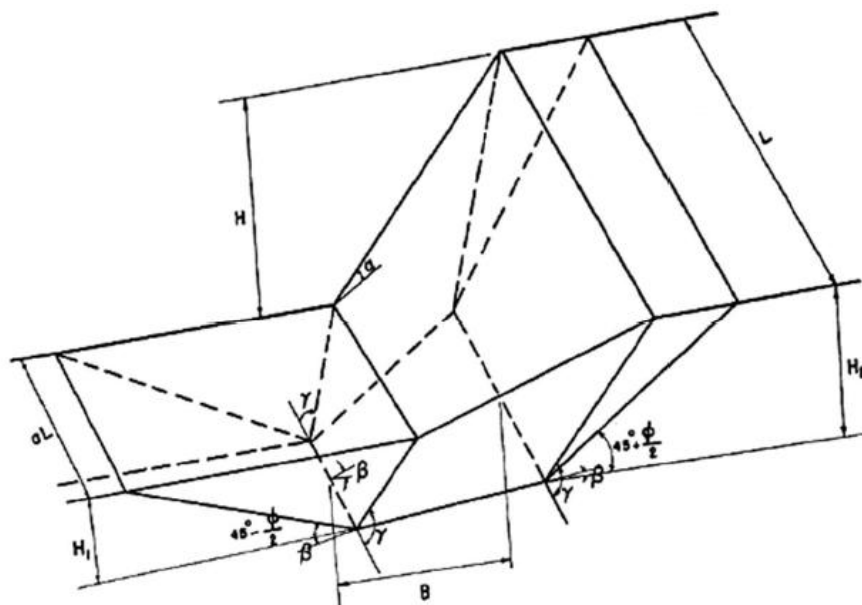
Метод на Ховланд (Hovland). Методът, който разработва Ховланд е въз основа на метода на Фелениус, който е допълнен с предположения в третото измерение. Вместо пластини в този метод се използват колони. В метода на Ховланд всички движещи сили между пластините, действащи по страните на колоните, се пренебрегват. Нормалните и тангенциалните сили, действащи в основата на всяка колона, се получават като компонента от теглото на колоната. Още едно предположение се заключава в това, че съществува движение само в едно направление и равновесието на системата се изчислява за това направление.

Ховланд установява, че всяко съотношение между кохезията и ъгъла на вътрешно триене на скалите може да има своя собствена критична повърхнина на свличане и геометрия. Получените резултати показват, че тримерният коефициент на устойчивост, по правило, е много по-висок от двумерния, изключвайки някои ситуации, при които тримерният коефициент може да бъде по-нисък (например за несвързани почви).

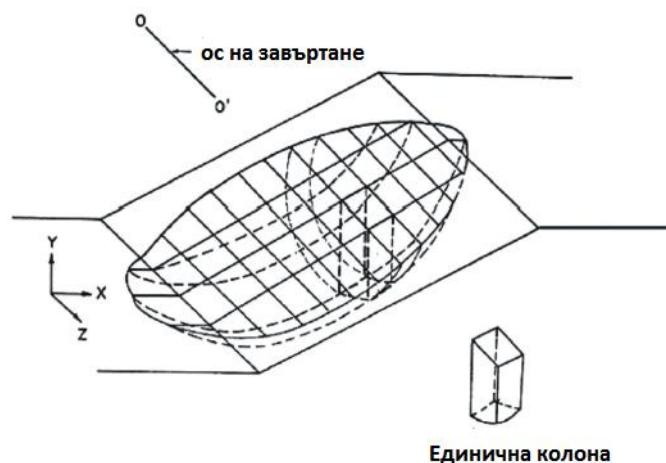
Метод на Чен (Chen R.H.) и модифициран метод на Чен и Чами (Chateau)

Чен и Чами извършват комплексни изследвания за влиянието на тримерния модел върху устойчивостта на откосите при широк спектър на изменение на свойствата на масива. Те предлагат два метода за изчисляване на коефициента на

устойчивост на откоси въз основа на метода на Спенсър за 3D модел в зависимост от характера на преместване на свлачищното тяло: за свлачищна повърхнина, представена на фигура 2.36 и за свлачищна повърхнина показана на фигура 2.37.



Фиг.2.36 Изчислителна схема за блоково преместване на свлачищно тяло



Фиг.2.37 Изчислителна схема при завъртане на свлачищно тяло

Освен посочените методи за 3D моделиране и анализ на устойчивостта на откосите, съществуват още редица методи, които се основават на двумерните като Метода на Хунг (въз основа на метода на Бишоп, опростения метод на Ямбу), метод на Дънкан Дж.М. и др. И при тези методи се установява тенденция за по-високи стойности на тримерния коефициент на устойчивост в сравнение с този, получен от решаването на равнината задача.

Изводи:

Понастоящем съществуват голям брой подходи за оценка на устойчивостта на откоси, което с оглед на приложимостта на един или друг метод, налага тяхното структуриране.

Йерархическата структура на методите за оценка на устойчивостта на откоси, разработена въз основа на механо-математическия подход, е издържана от гледна точка на формалната логика на класификациите и образува строго подчинена система на непресичащи се признаци (критерии).

В съответствие с предложените базиси за класификация в дисертационния труд, методите за оценка на устойчивостта на откоси условно могат да се разделят на следните принципни класа: методи, основани на анализа на граничното равновесие, методи, основани на структурния анализ; методи, основани на граничния анализ; методи, основани на вероятностния анализ; комбинирани методи, в т.ч. с използването на ГИС-анализ.

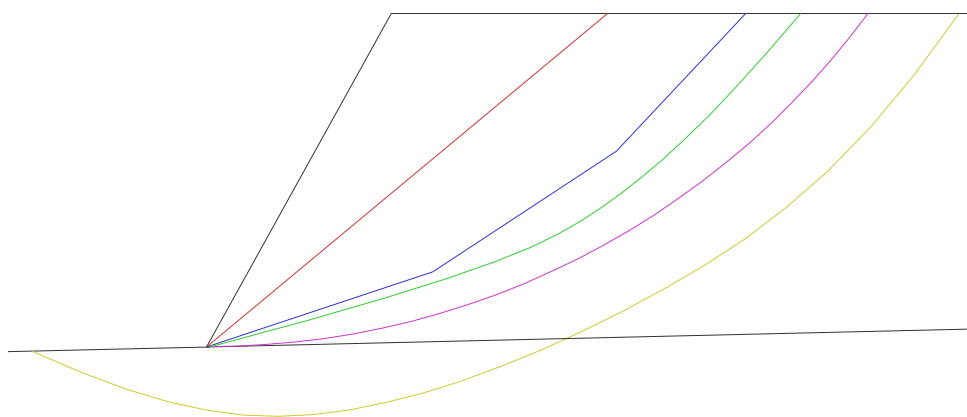
Комплексното приложение на съвременните методи, основани на различни принципи, оценката на тяхната сходимост, позволява значително да се повиши достоверността на резултатите при изчисляване на устойчивостта на откосите.

ГЛАВА 3. ТЕНДЕНЦИИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ОЦЕНКАТА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА ОТКОСИ

3.1 Оптимизиране на плъзгателната повърхнина

Първоначално при изчисляване устойчивостта на откосите, са били определени прости видове повърхнина, при които е възможно да се обруши свлачищното тяло (фиг.3.1):

- свличане по плоска повърхнина;
- свличане по кръговоцилиндрична повърхнина;
- свличане по повърхнина под формата на логаритмична спирала;
- свличане по повърхнина под формата на циклоид;
- свличане по блокова повърхнина на плъзгане;
- свличане по предварително зададена повърхнина на плъзгане.



Фиг.3.1 Видове форми на плъзгателна повърхнина

Намирането на най-опасната повърхнина на плъзгане (ако тя не е зададена предварително) при методите на граничното равновесие преминава през много етапи. През първия етап се определя вероятната плъзгателна повърхнина и се изчислява

коэффициента на устойчивост на откоса. Този алгоритъм се повтаря многократно за голям брой възможни плъзгателни повърхнини. Тази, при която се получава минимален коефициент на устойчивост се приема за най-опасна повърхнина на плъзгане. Изследванията през последните години предоставят възможност за постепенна промяна на плъзгателната повърхнина, в резултат на което се намалява коефициента на устойчивост на откоса, а самата плъзгателна повърхнина придобива вид отличаващ се от простия. Разгледания алгоритъм за минимизиране на коефициента на устойчивост за сметка на поетапното изменение на части от изчислителната проста плъзгателна повърхнина се нарича *оптимизиране на плъзгателната повърхнина*.

В общия случай задачата за установяване на формата и положението на повърхнината на плъзгане не е решима математически точно. Затова и съществуват толкова много изчислителни процедури. Голямо влияние оказва геологията на обекта и физико-механичните характеристики на почвите. Затова в някои случаи задачата за намиране на коефициента на устойчивост се решава като се разглеждат няколко фамилии плъзгателни повърхнини и се търси тази, при която коефициентът на устойчивост приема най-малка стойност. Ето защо:

- задачата за изследване устойчивостта на борда на рудник „Трояново-Север” е решавана за различни видове (като математически израз) плъзгателни повърхнини (в случая дъга от окръжност, параболи от втора и трета степен и сложна плъзгателна повърхнина, която започва като крива от втора степен и продължава по линия в междупластието);

- за всяка от видовете плъзгателни повърхнини се разглежда фамилия от линии чрез „плъзгане” на горния край на линията по стъпалото като от фамилията се избира онази, при която коефициентът на устойчивост приема най-малка стойност.

Величините, участващи във формула (3.1), се разглеждат като детерминирани, т.е. имат по една определена фиксирана стойност:

$$F = \frac{\operatorname{tg} \varphi \sum_{i=1}^n N_i + c L}{\sum_{i=1}^n T_i}, \quad (3.1)$$

където: $\operatorname{tg} \varphi \sum_{i=1}^n N_i$ е сумата от силите на триене, задържащи откоса;

$c L$ е сумата от силите на кохезията, задържащи откоса;

$\sum_{i=1}^n T_i$ е сумата от тангенциалните сили, движещи откоса.

За реализация на изчисленията, формула (3.1) се представя в следния разгънат вид (Trifonova, 2016):

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(\sum_{j=1}^{m_i} S_j \gamma_j \operatorname{tg} \varphi_j \right) \cos \alpha_i \right) + \sum_{j=1}^k c_j l_j}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (3.2)$$

където: n е броят на ламелите, на които се разделя площта, ограничена от контура на борда и повърхнината на плъзгане;

k - брой на частите, на които хлъзгателната повърхнина се разделя от различните литоложки разновидности;

m_i - брой части, на които i -тата ламела е разделена от отделните литоложки разновидности;

$\sum_{i=1}^n \left(\left(\sum_{j=1}^{m_i} S_j \gamma_j \operatorname{tg} \varphi_j \right) \cos \alpha_i \right)$ - сума от силите на триене;

$\sum_{j=1}^k c_j l_j$ - сума от силите на кохезията;

$\sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n P_i \sin \alpha_i$ - сума от тангенциалните сили;

P_i - тегло на ламелата;

α_i - ъгъл на наклона на допирателната към повърхнината на плъзгане в средата на основата на ламелата;

φ_j - ъгълът на вътрешно триене за съответната литоложка разновидност в ламелата;

S_j - лицето на част от ламелата, попадаща в дадена литоложка разновидност;

c_j - кохезията на съответната разновидност по хлъзгателната повърхнина;

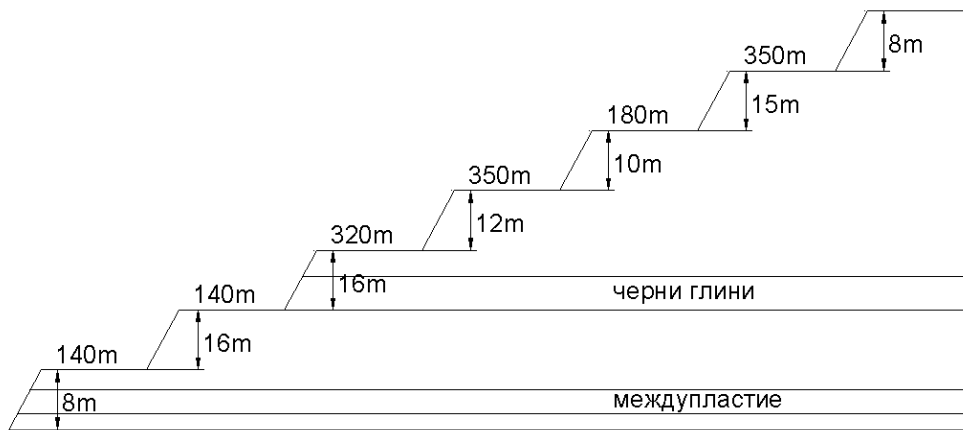
l_j - дължината на линията на плъзгане от дадена разновидност.

Изчисленията са извършени за стойности на якостните характеристики на литоложките разновидности от масива, дадени в таблица 3.1.

Таблица 3.1

Литоложки разновидности	Показатели	Обемна плътност, [kN/m ³]	Кохезия, [MPa]	Ъгъл на вътр. триене, [°]
II и III въглищен пласт		12.5	0.340	11.0
Междупластие		16.7	0.075	1.0
Черни глини		16.5	0.203	15.0
Синьо-зелени глини		18.2	0.130	6.0
Прахово-песъчливи глини		20.2	0.140	20.0

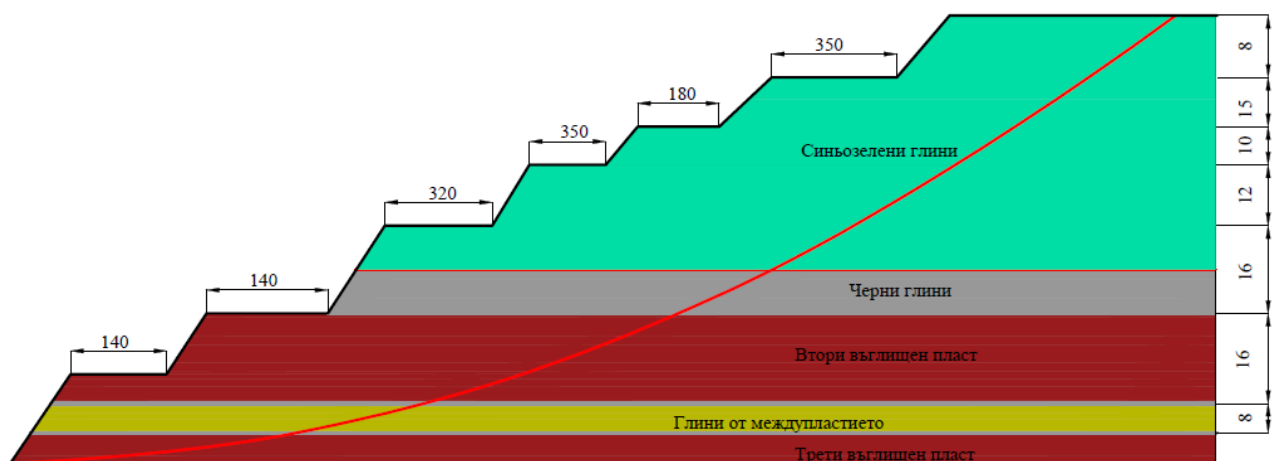
За геометрия на масива е използвана ситуация, схематично показана на фигура 3.2. Поради голямото съотношение между дължина и височина на профила, резултатите не могат да бъдат представени мащабно във формат А4. По тази причина всички фигури в настоящата разработка, свързани със стабилитетните изчисления, са представени схематично.



Фиг. 3.2 Схема на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“, Мина „Марица-изток“ АД

Анализът на резултатите от направените изчисления показва:

- Получените стойности за коефициента на устойчивост при трите набора от фамилии за плъзгателна повърхнина (дъга от окръжност и параболи от втора и трета степен) са приблизително еднакви. Разликите са под 3,5%. Получената най-ниска стойност е 1,3545.
- Най-нисък резултат за коефициента на устойчивост, а именно 1,253, се получава при избор на плъзгателна повърхнина, показана на фигура 3.3.



Фиг.3.3 Изчислителен профил на работния борд на рудник „Трояново-север“, Мина „Марица-изток“ АД

Решаването на задачата, свързана с определяне на формата на най-опасната повърхнина на плъзгане при минимален коефициент на устойчивост с методите на

граничното равновесие не може да се счита за завършена без да се оптимизира нейната форма. Това позволява съществено да се увеличи надеждността и точността на получените резултати при изчисляване на устойчивостта на откосите.

3.2 Вероятностен анализ и анализ на чувствителността на метода

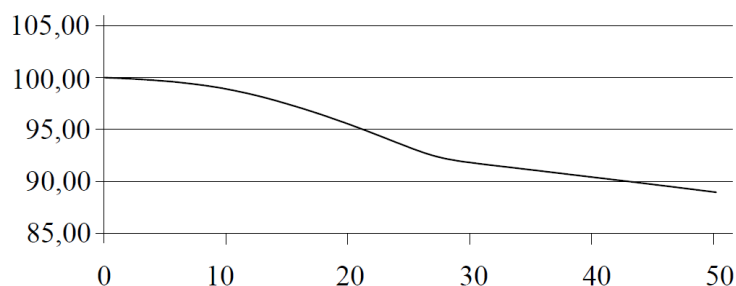
Вероятностният анализ при изчисляване устойчивостта на откосите става все по-актуален в световната практика, и все повече се прилага с нарастващото разбиране на дискретността (т.е. случайността) на редица стойности за физико-механичните свойства на скалите, получени в хода на инженерно-геоложките проучвания. Отчитайки широкия спектър на колебание на тези характеристики, вероятностният подход, свързан с прогнозирането на техните изменения, позволява да се погледне по-универсално от нова гледна точка.

Вероятността за развитие на свлачищен процес зависи от интервала на вземане на почвени проби по дължината на плъзгателната повърхнина, в случай на изменение на свойствата в зоната на призмата на възможното обрушване. В качеството си на пример по-долу в таблица 3.2 и на фигура 3.5 са представени различни стойности на вероятностите за развитие на свлачищен процес за различни широчини на зоните на нееднородност на призмата на възможното обрушване.

Таблица 3.2

Вероятност от развитие на свлачищен процес в зависимост от широчината на зоната на нееднородност в призмата на възможното обрушване (изменчивост на свойствата на масива)

Широчина на зоната на нееднородност на призмата на възможното обрушване	Вероятност от развитие на свлачищен процес (%)
Еднородна	74,65
50	89,11
30	91,7
20	95,55
10	99,2
Нееднородна за всяка изчислителна ламела	100



Фиг.3.5 Вероятност от развитие на свлачищен процес (%) в зависимост от широчината на зоната на нееднородност на призмата на възможното обрушване

Анализът на чувствителността е близък до вероятностният анализ, но заедно със задачите за вероятността от развитие на свлачищен процес в зависимост от изменчивостта на факторите за възникване на свлачище, в този случай се решава задачата за степента на зависимост между коефициента на устойчивост от закономерното изменение на тези или други параметри.

Вероятностният анализ позволява да се извърши оценка на свлачищната опасност (терминологично като вероятност от активизиране на свлачищен процес).

Анализът на чувствителността позволява да се прогнозира изменението на коефициента на устойчивост на откоса в зависимост от закономерното изменение на един или няколко фактора за възникване на свлачище.

3.3 Изследване на влиянието на физико-механичните показатели върху поведението на скалния масив

Във всеки момент устойчивостта на борда представлява сложна функция, зависеща от много променливи: ъгъл на вътрешно триене φ , кохезия c и плътност γ на масива, височина H и ъгъл α на борда, т.е. $\eta = f(\gamma, \varphi, c, H, \alpha)$. Преди да се пристъпи към изследване на тази функция е желателно да се установи влиянието върху нея на всеки един или поне на повече от аргументите ѝ.

За да се определи влиянието на всеки от посочените аргументи върху стойността на коефициента на устойчивост, два от трите параметъра се фиксират на първоначално приетите им стойности (характерни за съответната литоложка разновидност), а третият се променя. За да има сравнимост на резултатите, стойностите на параметрите γ , c и φ се изменят с едни и същи относителни разлики ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$, $\pm 20\%$, $\pm 25\%$, $\pm 30\%$), т.е. приемаме условно, че диапазонът на изменение на отклоненията е в интервала $[-30\%, +30\%]$.

За базови стойности на якостните показатели на литоложките разновидности, приложени във факторно-диапазонния анализ, се използват данните за условията на рудник „Трояново-север“, Мини „Марица-изток“ АД (табл.3.1).

Изчисленията са направени при плъзгателна повърхнина, представляваща парабола от втора степен, показана на фигура 3.3, при която за посочените входни данни е получен коефициент на устойчивост 1,3494. Тъй като масивът е изграден от няколко литоложки разновидности, то се приема следното: променянето на съответния параметър (γ, φ или c) е процентно еднакво във всяка от разновидностите. Например, ако са фиксирани γ и c и се променя с 20% ъгъла на вътрешно триене φ , то изчисленията за коефициента на устойчивост ще се направят с нови стойности за φ както следва:

II и III въгл. пласт	Междупластие	Черни глини	Синьо-зелени глини	Прахово-песъчливи глини
132	12	18	72	24

Таблица 3.3

$\Delta\gamma, \%$	$\eta(\gamma)$	$\Delta\eta(\gamma), \%$
-30	1.8967	40.56
-25	1.7751	31.55
-20	1.6687	23.66
-15	1.5747	16.70
-10	1.4913	10.52
-5	1.4166	4.98
0	1.3494	0.00
5	1.2886	-4.51
10	1.2333	-8.60
15	1.1828	-12.35
20	1.1365	-15.78
25	1.0940	-18.93
30	1.0547	-21.84

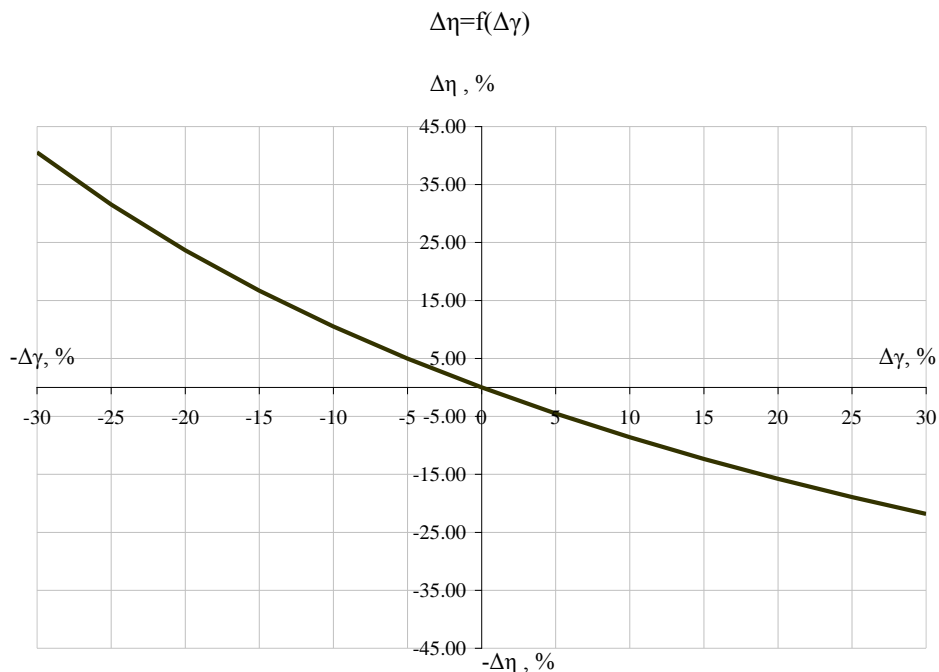
Таблица 3.4

$\Delta\gamma, \%$	$\eta(\epsilon)$	$\Delta\eta(\epsilon), \%$
-30	0.9663	-28.39
-25	1.0301	-23.66
-20	1.0940	-18.93
-15	1.1578	-14.20
-10	1.2217	-9.46
-5	1.2855	-4.74
0	1.3494	0.00
5	1.4132	4.73
10	1.4771	9.46
15	1.5409	14.19
20	1.6048	18.93
25	1.6687	23.66
30	1.7325	28.39

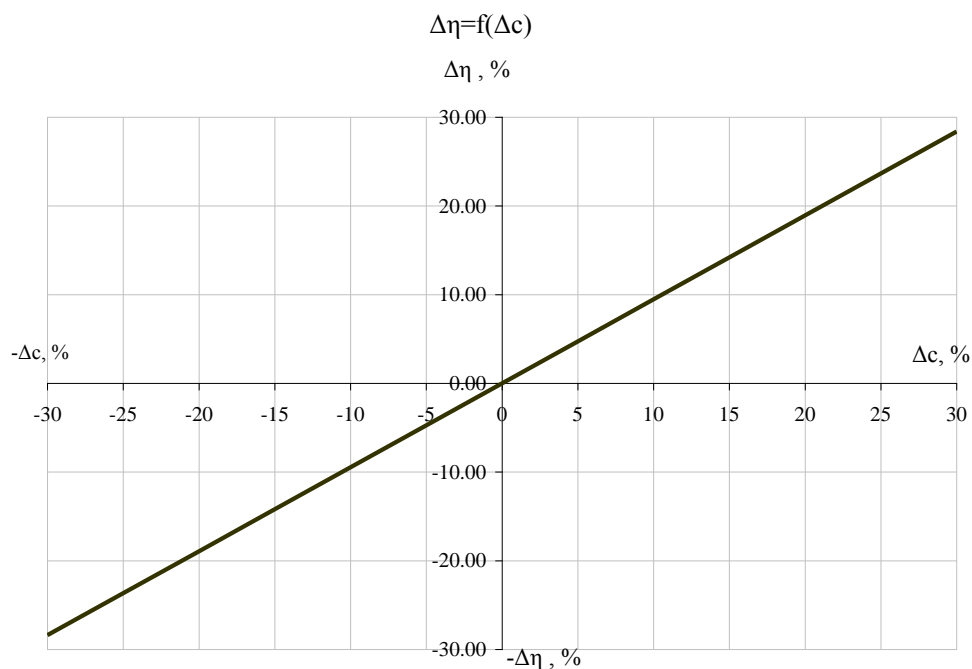
Таблица 3.5

$\Delta\gamma, \%$	$\eta(\varphi)$	$\Delta\eta(\varphi), \%$
-30	1.3273	-1.64
-25	1.3310	-1.36
-20	1.3346	-1.10
-15	1.3383	-0.82
-10	1.3420	-0.55
-5	1.3457	-0.27
0	1.3494	0.00
5	1.3531	0.27
10	1.3568	0.55
15	1.3606	0.83
20	1.3644	1.11
25	1.3682	1.39
30	1.3720	1.67

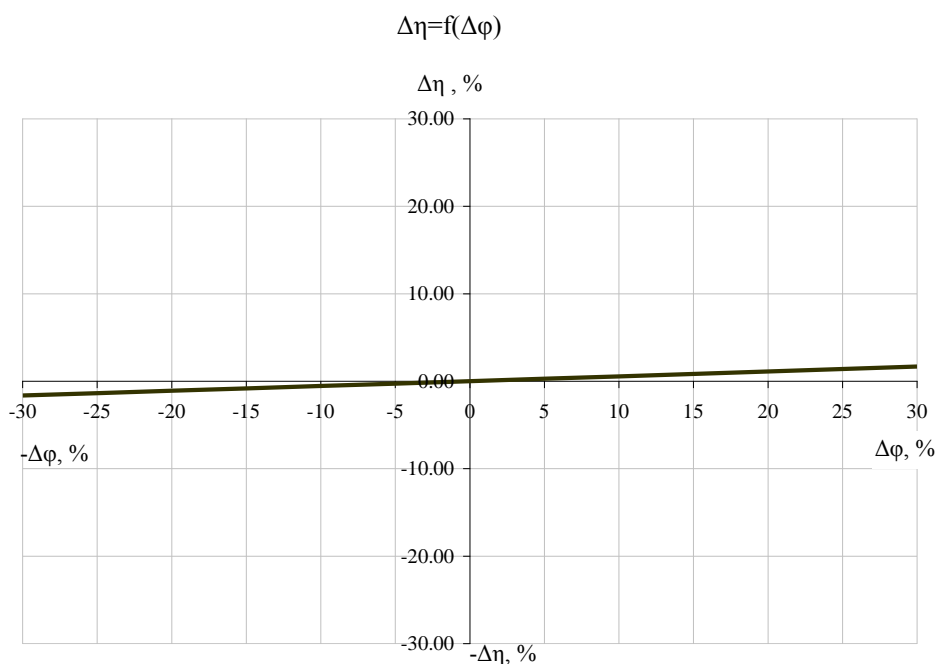
Въз основа на получените крайни резултати (таблицы 3.3, 3.4 и 3.5) са построени графиките, представени на фигури 3.6, 3.7 и 3.8, които отразяват характерните зависимости на изменението на стойността на коефициента на устойчивост на борда, изграден от различни литоложки разновидности на примера на рудник Трояново-север.



Фиг.3.6 Влияние на изменението на обемната плътност върху коефициента на устойчивост на борда



Фиг. 3.7 Влияние на изменението на кохезията върху коефициента на устойчивост на борда



Фиг. 3.8 Влияние на изменението на ъгъла на вътрешно триене върху коефициента на устойчивост на борда

В таблица 3.6 са дадени аналогични резултати за изменението на стойността на коефициента на устойчивост на борда на примера на рудник “Трояново-север”, при едновременно изменение на трите якостни показатели на масива в интервала [-30 %, +30 %] със стъпка 5%.

Таблица 3.6

$\Delta\gamma, \%$	$\Delta c, \%$	$\Delta\varphi, \%$	$\eta(\gamma, \varphi, c)$	$\Delta\eta(\gamma, \varphi, c), \%$
-30	-30	-30	1.3273	-1.64
-25	-25	-25	1.3310	-1.36
-20	-20	-20	1.3346	-1.10
-15	-15	-15	1.3383	-0.82
-10	-10	-10	1.3420	-0.55
-5	-5	-5	1.3457	-0.27
0	0	0	1.3494	0.00
5	5	5	1.3531	0.27
10	10	10	1.3568	0.55
15	15	15	1.3606	0.83
20	20	20	1.3644	1.11
25	25	25	1.3682	1.39
30	30	30	1.3720	1.67

По-важните изводи, които произтичат от извършените изследвания са следните:

1. Най-съществено влияние върху устойчивостта на откоса на борда за условията на рудник „Трояново-север“ оказват плътността и кохезията по плъзгателната повърхнина (фиг.3.6 и фиг.3.7). Тези именно изчислителни показатели следва да се определят с повишена точност при лабораторните изследвания и обратните изчисления.

2. Изменението на стойностите на ъгъла на вътрешно триене води до пренебрежимо малки промени в стойността на коефициента на устойчивост.

3. Изменението на кохезията влияе линейно с коефициент 1 върху изменението на коефициента на устойчивост, т.е. $x\%$ изменение на кохезията води до приблизително $x\%$ изменение на стойността на коефициента на устойчивост.

4. Влиянието на обемната плътност върху стабилитета би могло да се приеме за линейно само в малка околност на нулата. С нарастване на изменението на този параметър, стойностите на коефициента на устойчивост силно се променят, като намаляването на обемната плътност с 30% спрямо средни стойности за отделните литоложки разновидности води до значително по-високи стойности за коефициента на устойчивост ($\Delta\eta=40,56\%$).

5. Тенденцията на изменение на коефициента на устойчивост при вариране на стойностите на якостните показатели с $\pm 30\%$ (със стъпка 5%) е в следните интервали:

- $[-21,84\%; 40,56\%]$ – при изменение на обемната плътност;
- $[-28,39\%; +28,39\%]$ – при изменение на кохезията;
- $[-1,64\%; 1,67\%]$ – при изменение на ъгъла на вътрешно триене.

Не се наблюдава чувствително колебание в изменението на коефициента на устойчивост при изменение на якостните показатели в използвания математически модел при различни апроксимиращи функции на плъзгателната повърхнина.

3.4 Приложение на вероятностния подход за оценка на устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново-север“, мини „Марица-изток“ АД

Наблюденията показват, че якостните свойства на скалите имат ясно изразена вероятностна природа и се характеризират не с една стойност, а със съответен вероятностен закон (*Соболь, 1972*). За пълното отчитане на наличната информация, най-подходящи за изследване са статистическите методи. В случая е използван методът Монте-Карло.

Изчисленията за устойчивостта на борда на рудник „Трояново-север“ са повторени с използване на същите плъзгателни повърхнини, както в параграф 3.1, при същата геометрия на масива, но с използване на вероятностни редове за стойностите на обемната плътност, ъгъла на вътрешно триене и кохезията за всяка от литоложките разновидности в масива.

За целта:

1. На база на зададения статистически закон на разпределение на всяка от величините γ , φ , c се построява нейната кумулативна функция. Така се получават три такива функции, да ги означим съответно $F_1(m)$, $F_2(m)$, $F_3(m)$, т.е. $F_1(m)$ е

кумулятивната функция на случайната величина γ , $F_2(m)$ е кумулативната функция на случайната величина ϕ и $F_3(m)$ е кумулативната функция на случайната величина c (кохезия).

2. С подходящ генератор на случайни числа се генерират последователно три случайни числа ξ_1, ξ_2, ξ_3 . Може да се счита, че те са стойности на равномерно разпределена в интервала $[0, 1)$ случайна величина. Да означим с $F_i^{-1}(n)$ обратната функция на $F_i(m)$. Пресмятат се трите стойности $F_i^{-1}(\xi_i)$, като по този начин се получава една възможна тройка от стойности на величините γ, ϕ, c , участващи в пресмятането на коефициента на устойчивост.

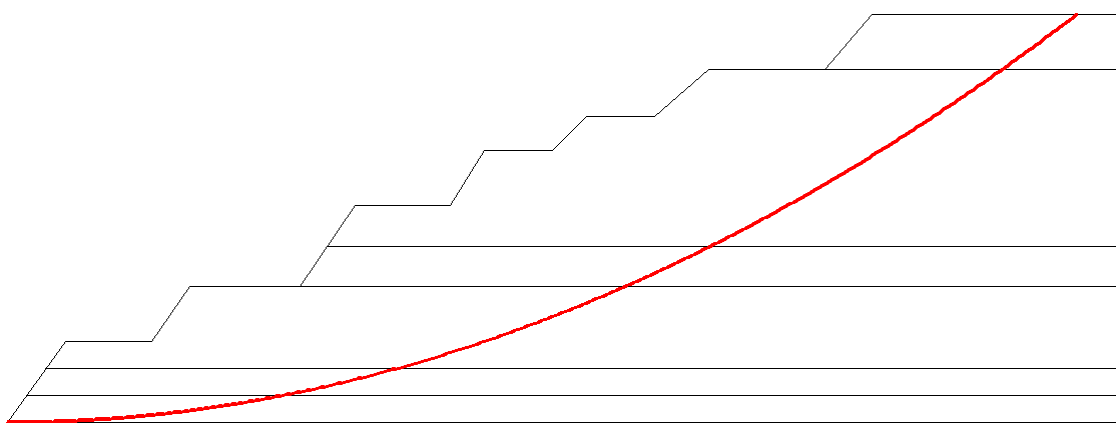
3. С така намерените стойности за γ, ϕ, c по алгоритъма от параграф 3.1. се намира една стойност за коефициента на устойчивост F , да я означим с F_1 .

Втора и трета стъпка се изпълняват многократно (N на брой пъти), като N е поне четирицифрено число (правени са изчисления и при $N=100000$), в резултат на което се получават N на брой стойности за коефициента на устойчивост: $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N$. Въз основа на Закона за големите числа може да се приеме, че стойността

$$\bar{F} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_N}{N} \quad (3.12)$$

е една достатъчно точна оценка на коефициента на устойчивост. В случая за стойност на N е прието 10000.

Използвайки вероятностна схема на изчисления по трите набора от фамилии за плъзгателна повърхнина (дъга от окръжност и параболи от втора и трета степен), аналогично на параграф 3.1 се получават приблизително еднакви резултати, дори с разлика под 3,1%. Получената най-ниска стойност е **1,3494** за плъзгателната повърхнина от фиг.3.11. Тази плъзгателна повърхнина е използвана и за факторно-диапазонния анализ в параграф 3.3.



Фиг. 3.11 Изчислителна схема на работния борд на рудник „Трояново-север“ с използване на метода Монте-Карло

Отново най-нисък резултат за коефициента на устойчивост, а именно **1,248** се получава при избор на плъзгателната повърхнина, показана на фиг. 3.11, но вече с включване на Метод Монте-Карло в изчислителната схема.

Изводи:

Устойчивостта на бордовете във всеки момент от време представлява сложна функция на много променливи, всяка от които може да приема различни стойности, обусловени от случайния характер на природните и минно-техническите условия.

Решаването на задачата за определяне на най-опасната повърхнина на плъзгане при минимален коефициент на устойчивост с методите на гранично равновесие не може да се смята за завършена без да е направена оптимизация, приложението на която позволява съществено да се увеличи надеждността и точността на резултатите, получени при оценка на устойчивостта на откосите.

Чрез вероятностния анализ става все по-достъпна оценката за възникване на свлачищна опасност или терминологично изразено определя вероятността за активизиране на свлачищен процес.

Анализът на чувствителността на метода се доближава до вероятностния анализ, но вместо да се изследва зависимостта от вероятности, се решава задачата за степента на зависимост между коефициента на устойчивост от закономерното изменение на един или друг параметър. По този начин, чрез анализа на чувствителността на метода, може да се прогнозира изменението на коефициента на устойчивост на борда в зависимост от изменението (във времето или пространството) на един или няколко фактора.

Получените количествени оценки за влиянието на физичните, якостни и технологични параметри на масива върху устойчивостта показват, че:

- най-съществено влияние оказват обемната плътност, особено на синьо-зелените глини и якостните характеристики на потенциалната плъзгателна повърхнина в основата на борда;
- най-бързо и ефикасно управление на устойчивостта може да се постигне с намаляване на височините на работните стъпала.

ГЛАВА 4. ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ ЗА ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА ОТКОСИ

4.1 Характерни особености на Метода на крайните елементи (МКЕ)

Характерна особеност на МКЕ е, че непрекъснатата среда се разглежда като съставена от краен брой отделни елементи.

Естествено, всяко непрекъснато тяло, разделено на елементи би притежавало значителна податливост, което ще доведе до съществени грешки при определяне на напреженията и деформациите. Затова е необходимо въвеждането на някои принципи и предпоставки, които ще позволят при дискретизация на средата, решението на задачата да бъде с приемлива за практиката точност (*Цонков и др., 1984*):

1) Непрекъснатата среда се разделя мислено на отделни елементи с линии или повърхнини без да се разглежда поведението на отделните късове получени при това разделяне, т.е. средата си остава непрекъсната, но съставена от отделни елементи;

2) Връзката между отделните елементи се осъществява в краен брой точки, разположени по границите на елемента. Преместванията на тези точки, в резултат на общата деформация на твърдото тяло се въвеждат като основни неизвестни параметри на задачата;

3) Компонентите на преместванията вътре в даден елемент се получават по определени функции на координатите, а преместванията на връзките (възлите) на елемента се включват като коефициенти при построяване на тези функции.

С определена степен на точност Метода на крайните елементи може да се използва за изследване на напрегнатото и деформирано състояние на среди с нелинейни зависимости между напрежения и деформации, използвайки итерационните методи на изчисления.

4.2. Приложение на МКЕ при условия на слаби скали (глини)

4.2.1. Обща постановка

Методът на крайните елементи е метод на определяне на връзката между възловите сили и възловите премествания след дискретизацията на твърдо тяло на крайни елементи, свързани във възли. Възловите сили съответстват на полето на напреженията в елементите, а възловите премествания са параметри на апроксимираното поле на преместванията в тялото. Нелинейна връзка между тях може да има, ако има нелинейна връзка между напреженията и деформациите и/или нелинейна връзка между деформациите и преместванията. Ето защо, ние различаваме два вида нелинейности. Първият източник на нелинейност наричаме **физическа нелинейност**, която се дължи на нелинейност в зависимостта между напрежения и деформации или все едно в обобщения закон на Хук: $\{\sigma\} = [C(\{\varepsilon\})]\{\varepsilon\}$. Такава зависимост имаме при пластичните материали (цветни метали, стомана и термопластични пластмаси), които са достигнали своята граница на провлачване и имат нелинейно поведение както показват сигма-епсилон диаграмите им. Вторият вид нелинейност е **геометричната нелинейност**, която се появява във връзката между преместванията и деформациите: $\{\varepsilon\} = [B(\{d\})]\{d\}$. Тази зависимост изразена в **крайни деформации** за една от компонентите на деформациите изглежда така:

$$\varepsilon_x = \partial u / \partial x + 1/2[(\partial u / \partial x)^2 + (\partial x / \partial v)^2 + (\partial w / \partial x)^2], \quad (4.73)$$

като квадратните членове в средните скоби са значими при големи деформации – първия, и при големи завъртания – следващите два.

В задачите на механиката на еластичното тяло линейността се явява следствие на предположението, че има линейна зависимост между:

а) деформации и премествания (в смисъл на зависимостта $\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e$);

б) напреженията и деформациите (в смисъл на равенството $\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}$).

Както и досега с $\{\delta\}^e$ са означени преместванията, $[B]$ е матрицата на възловите координати, $\{\varepsilon\}$ са деформациите, $\{\sigma\}$ са напреженията, $[D]$ е матрицата на еластичните константи, $\{\varepsilon_0\}$ са началните деформации, $\{\sigma_0\}$ са началните напрежения.

В глава 4 винаги се предполага изпълнението и на двете линейни зависимости. Ако връзката между деформации и премествания е нелинейна се казва, че е налице геометрична нелинейност. При нелинейна зависимост между напрежения и деформации се говори за физически нелинейна задача.

Решаването на нелинейни задачи се усложнява и от факта, че за разлика от линейните задачи тук често решението не е единствено. Следователно намереното решение не винаги е търсеното. За получаване на правилното решение трябва да се използва метода на малките нараствания и строго да се съблюдава физическата същност на задачата.

4.2.2. Физически нелинейни задачи

Задачата на линейната теория на еластичността в премествания винаги се свежда до решаване на системата уравнения

$$[K]\{\delta\} - \{R\} = 0, \quad (4.74)$$

където векторът $[R]$ съдържа всички сили, обусловени от външни натоварвания, начални напрежения и деформации и т. н.

При извеждането на това равенство бе използван закона за линейна еластичност във вида

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}. \quad (4.75)$$

Освен това се предполагаше линейна връзка между напрежения и деформации, преместванията се считаха непрекъснати и се удовлетворяваха уравненията за равновесие (поне приблизително).

При решаване на задачи при малки деформации, при които се използват други, възможно и нелинейни определящи уравнения, следва да се измени само равенство (4.75). Новата зависимост може да се запише във вида

$$F(\{\sigma\}, \{\varepsilon\}) = 0. \quad (4.76)$$

Лявата страна на това равенство е функция, която трябва да бъде известна, например от лабораторни изследвания, до началото на решаване на нелинейната задача. Т.е. това е входна информация.

Ако се отдаде възможност да се намери такова решение на системата уравнения (4.74), че при съответстващ избор на един или няколко, съдържащи се в (4.75) параметри $[D]$, $\{\varepsilon_0\}$ или $\{\sigma_0\}$, тези уравнения и равенство (4.76) се удовлетворяват при едни и същи стойности на напреженията и деформациите, то полученото решение ще бъде търсеното.

Очевидно, че при решаването е целесъобразно да се използват итерационни методи.

4.2.3. Итеративни методи за приложение на МКЕ при слаби скали

При прилагане на МКЕ в условията на слаби скали се използват три итеративни метода: метод на променливата коравина, метод на началните напрежения и метода на началните деформации.

Методът на променливата коравина може да се използва в случай, когато зависимостта между напреженията и деформациите (4.76), характеризираща

поведението на материала, може да се представи във вида (4.75), където матрицата на еластичност $[D]$ зависи от достигнатото ниво на деформациите, т. е. има вида

$$[D] = [D(\{\varepsilon\})] = [D(\{\delta\})], \quad (4.77)$$

Тъй като матрицата на еластичност влияе на окончателния вид на глобалната матрица на коравината, то се достига до системата уравнения

$$\{\psi\} = [K(\{\delta\})]\{\delta\} - \{R\} = 0, \quad (4.78)$$

които могат да се решат по различни итерационни методи.

Възможно е прилагането например на следния прост итерационен процес. Отначало се предполага, че $\{\delta\}_0 = 0$, пресмята се $[K(\{\delta\}_0)] = [K_0]$ и се намират преместванията $\{\delta\}_1 = [K_0]^{-1}\{R\}$. Процеса се повтаря в съответствие с формулата

$$\{\delta\}_n = [K_0]_{n-1}^{-1}\{R\} \quad (4.79)$$

до тогава, докато преместванията престанат да се изменят.

Ако определящите уравнения са такива, че равенство (4.77) може да бъде записано само за нарастванията на напреженията и деформациите, то описаният процес следва да се приложи за нарастванията на натоварването, като всеки път се отчитат по-рано достигнатите стойности.

4.2.4. Природните фактори като причина за поставяне на нелинейна задача

Значителна част от находищата на рудни полезни изкопаеми, разработвани по открит и подземен начин залягат в здрави, но напукани скали. Прекъснатостта на масива оказва непосредствено влияние върху ефективността на прилаганата добивна технология. Значителната разлика между механичните показатели, определени в лабораторни и натурни условия се дължи преди всичко на напукаността и ориентацията на приложеното натоварване спрямо отслабващите повърхнини.

С цел установяване на влиянието на целия скален комплекс върху натоварването на работните пространства е целесъобразно да се състави първоначално модел, включващ терена на повърхността т.е. да се отчете цялата дълбочина на разработване. Следва преминаване към детайлизиране на определена част от схемата. Този подход, съчетан с изготвяне на по-подробни изчислителни схеми осигурява по-пълна картина на разпределение на изследваните параметри. Отчитайки физико-механичните свойства на скалите, получени в лабораторни условия, геомеханичният модел следва да може да решава задачата и в зоната на нелинейните зависимости между напрежения и деформации. Моделът следва да осигури и възможност за обратен анализ т.е. ако има натрупани натурни наблюдения за движение на скалите, да се търси възможност за определяне на якостните и деформационни показатели в масива.

В конкретния случай е използван методът на променливата коравина.

Нека се приеме, че при условие

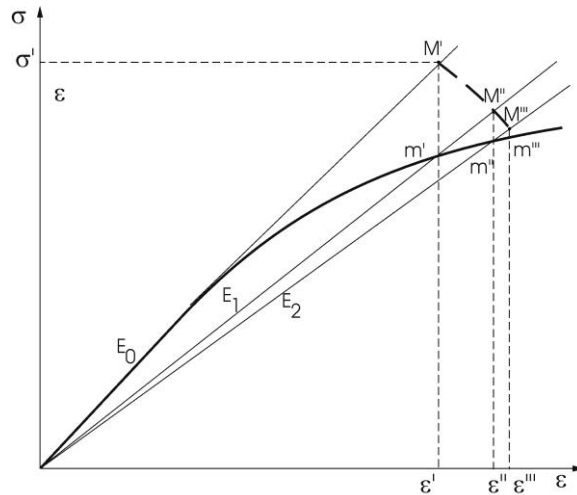
$$\sigma \leq \sigma_0 \quad (4.80)$$

деформирането на тялото се подчинява на линейния закон (4.75), а когато условие (4.76) не е изпълнено, деформирането на тялото следва нелинейния закон

$$\{\sigma\} = f(\{\varepsilon\}) \quad (4.81)$$

Определянето на напрегнатото и деформирано състояние на средата с нелинейни характеристики съгласно условие (4.77) налага използването на итерационна процедура.

На фигура 4.6 е показан принципният подход за използване на този алгоритъм. Най-напред се решава еластичната задача с модул на еластичност E_0 , съответстващ на началното състояние на елемента.



Фиг. 4.6 Последователно приближава-не с използване метода на променливата коравина

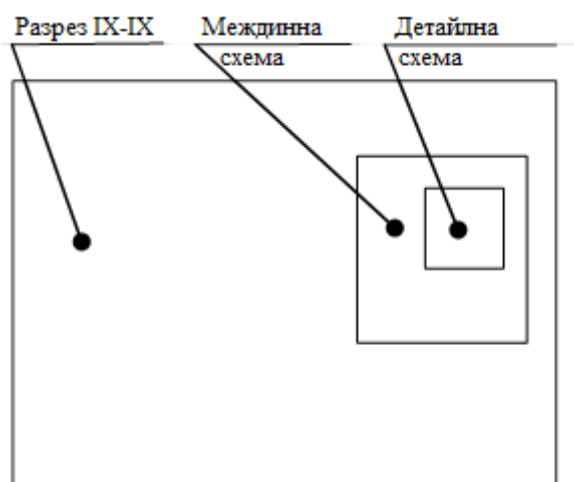
Извършва се проверка и ако се окаже, че условие (4.76) не е изпълнено, в смисъл напреженията излизат извън пределите на линейния участък, се извършва следната последователност от действия. Вземайки за базова точка полученото първо решение на еластичната задача за $\{\varepsilon'\}$, съгласно уравнение (4.77) се определя съответната големина на напреженията в нелинейния елемент – т.е. определя се точката m' (фиг. 4.6). Ако разликата $(M'-m')$ е по-голяма от предварително зададена величина, съответстваща на необходимата точност на решението, точката M' с координати σ' и ε' не съответства на реалните свойства на тялото и следва провеждане на втората итерация. Отново се решава еластичната задача, но при съставяне на матрицата на коравината на елементите, за които не е изпълнено условие (4.77), вместо модула E_0 се въвежда секущият модул E_1 . Паралелно с E_1 се изменя и коефициентът на Поасон μ . След втората изчислителна процедура на линейната задача се получава точката M'' . Следващата итерация става по вече описания път. Изчислителният процес продължава докато се достигне такава близост на точките M^n и m^n , за която е изпълнено предварително зададеното условие на необходимата точност.

Алгоритмизацията на схемата за реализиране на изчислителния процес предвижда последователна проверка на всички елементи. В зависимост от големината на натоварване се променя броят на елементите, за които се налага изменение на стойностите на E_n на съответната итерация.

4.2.5 Метод на пълзящата изчислителна схема

Детайлизирането на решението на задачата за определяне на оптималните параметри на добивната технология се основава на подход, съчетаващ постепенно

приближаване на изчислителната схема до разглеждания участък. Целта на подобна реализация на решението по метода МКЕ е постепенно да се намали площта на разглеждания сектор, което осигурява много голяма детайлност на представянето на различните конструктивни параметри на системата на разработване. Същевременно, всяка предишна реализирана вече схема се явява информационна база, формираща началните условия за следващата. По този начин се достига до схема, представляваща конкретен разрез от документацията на рудничното поле. На фигура 4.7 е показана общата идея на този подход, която е приложена при решаване на редица задачи. Изследователят има възможност да насочи своето внимание към строго определена зона, в която да бъде изградена мрежата на базата на неговото субективно желание. Например това могат да бъдат багерната заходка, откосът и работната площадка. Налице е една ръчно-машинна процедура, съчетаваща в себе си елементи на автоматично генериране на мрежата с ръчно избиране на детайлната изследвана област.



Фиг. 4.7 Пълзяща изчислителна схема

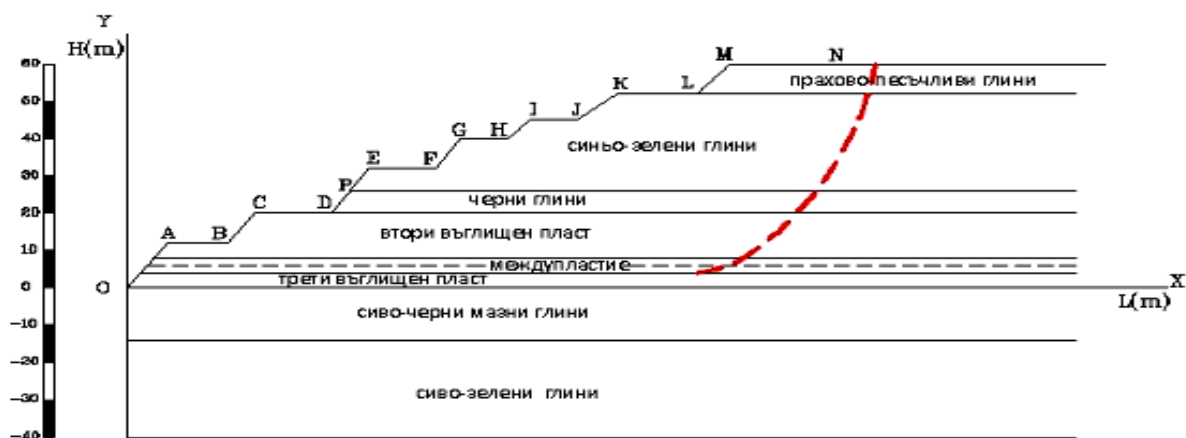
Решаването на задачата за определяне на оптималните параметри на добивната технология за условията на 200 метровата зона – участък № 9 се основава на подход, съчетаващ постепенно приближаване на изчислителната схема до разглеждания участък.

Би било подходящо това да се нарече Метод на пълзящата изчислителна схема.

4.3. Приложение на МКЕ за условията на рудник „Трояново-север“, Мини „Марица-изток“ АД

Минната (миннодобивната) промишленост в България се основава предимно на открития начин на добив на полезни изкопаеми. Устойчивостта на бордовете на рудниците е един от основните въпроси при разработването на находищата на полезни изкопаеми по открит начин.

Разглежда се изчислителен профил на работен борд на рудник „Трояново-Север“ (фиг.4.8). Физичните свойства и якостните показатели на литоложките разновидности на рудник “Трояново-Север” са представени в таблица 4.1.



Фиг. 4.8 Изчислителен профил на работния борд на рудник “Трояново-Север”

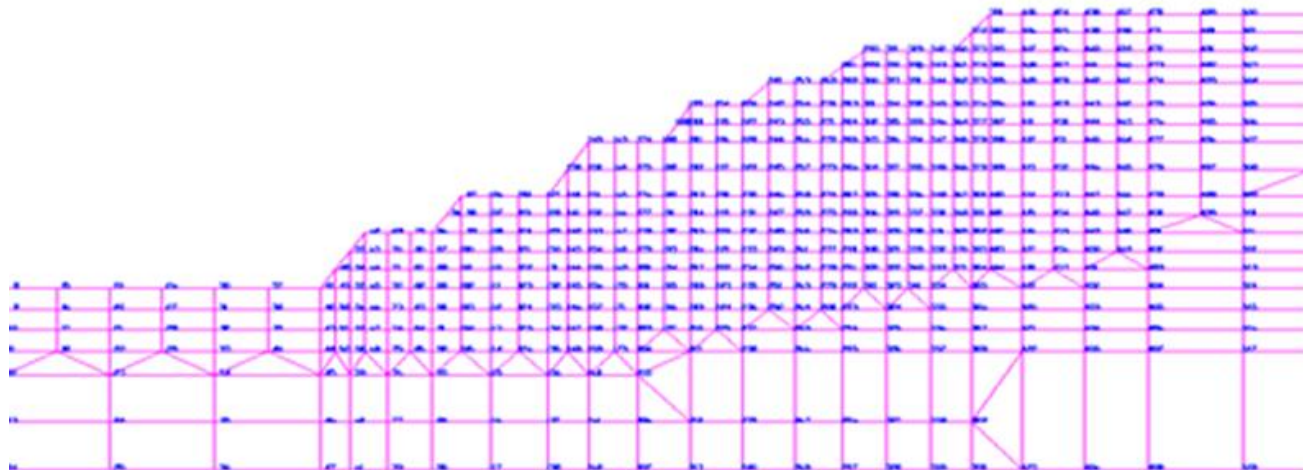
Таблица 4.1

Физични свойства и якостни показатели на литоложките разновидности на рудник “Трояново-Север”

Показатели Литоложки разновидности	Модул на еластичност E, МПа	Коеф. на Поасон μ	Обемна плътност γ , kN/m ³	Кохезия C, МПа	Ъгъл на вътрешно триене ϕ , °	Якост на опън σ_{op} , МПа
II и III въглищен пласт, $A_c=30\%$	61.50	0.45	12.50	0.340	11.0	0.279
Междупластие (сиво-зелени мазни глини)	12.50	0.30	16.70	0.075	1.0	0.047
Черни глини	7.22	0.21	16.50	0.203	15.0	0.219
Синьо-зелени глини	10.49	0.38	18.20	0.130	6.0	0.080
Прахово- песъчливи глини	6.63	0.28	20.20	0.140	20.0	0.290
Сиво-черни мазни глини	25-64	0.40	16.00	0.100	3.0	0.035
Сиво-зелени глини	11-32	0.36	18.20	0.120	3.0	0.130

Изчисления за оценка на устойчивостта на откоса са проведени със специализираната програма по метода на крайните елементи (SSA - slip surface stress analysis – анализ на напреженията по повърхността на плъзгане) за обясняване на механизма на деформиране се използват програми за напрегнатото състояние на масива. Компютърните програми са адаптирани към специфичните условия на рудник «Трояново-север».

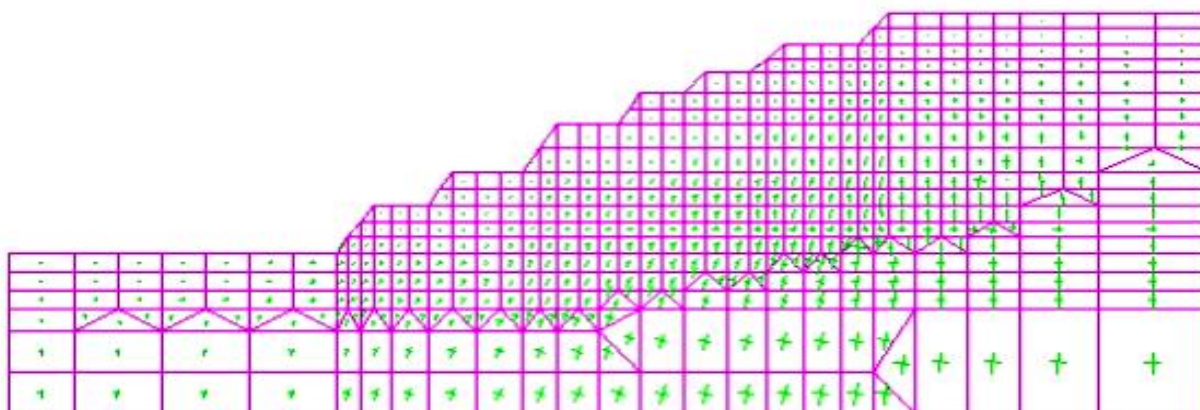
Методът се основава на дискретизацията на откоси с прости по форма елементи, наречени “крайни елементи”. На фигура 4.9 е представена получената схема на дискретизация на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“.



Фиг. 3.21. Схема на дискретизация на избрания профилна работен борд на рудник Трояново-север

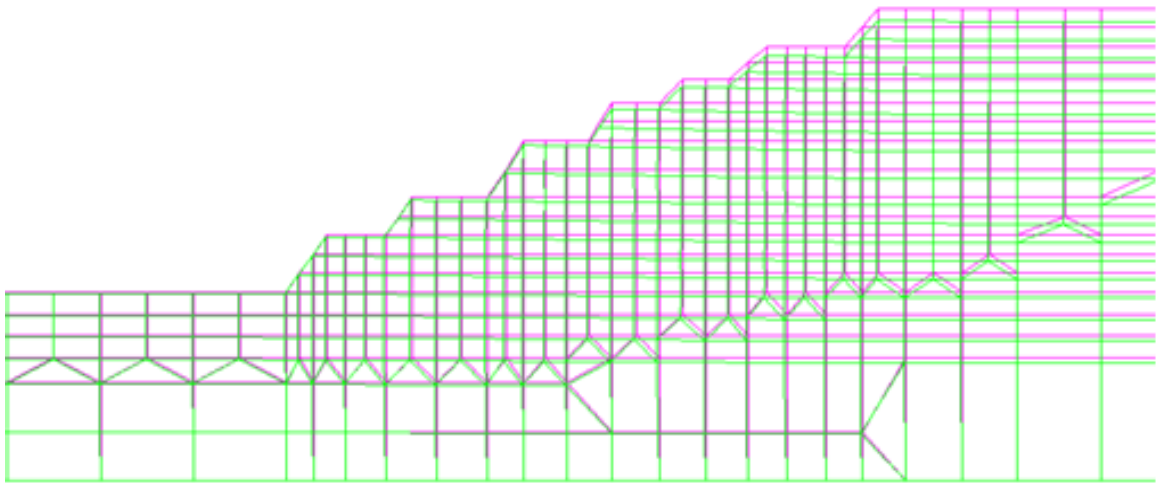
Получените резултати при използването на софтуерния продукт са:

- разпределение на главните напрежения при напрегнатото състояние на масива на работния борд на рудник „Трояново-север“ (със зелен цвят са покани посоката и големината на главните напрежения σ_1 и σ_3 ; големите са σ_1 , а по-малките са σ_3 - фиг. 4.10);



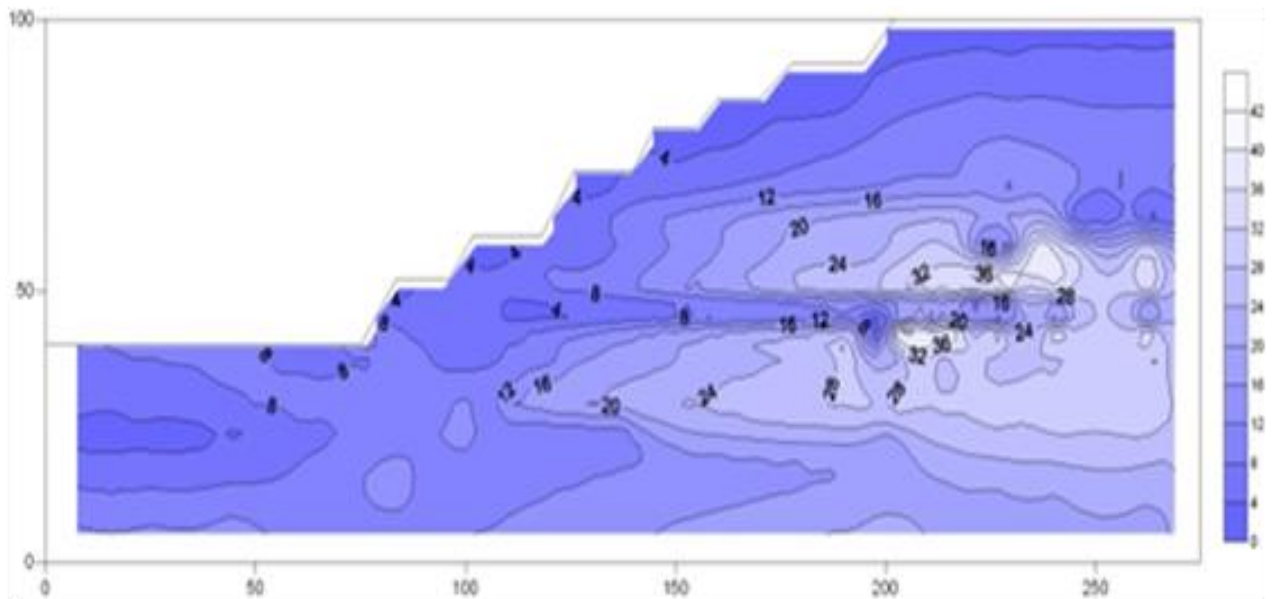
Фиг. 4.10. Разпределение на напрегнатото състояние на работен борд на рудник “Трояново-Север”

- разпределение на деформацията на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“ (със зеления цвят е показано деформираното състояние на бордовете (фиг. 4.11));



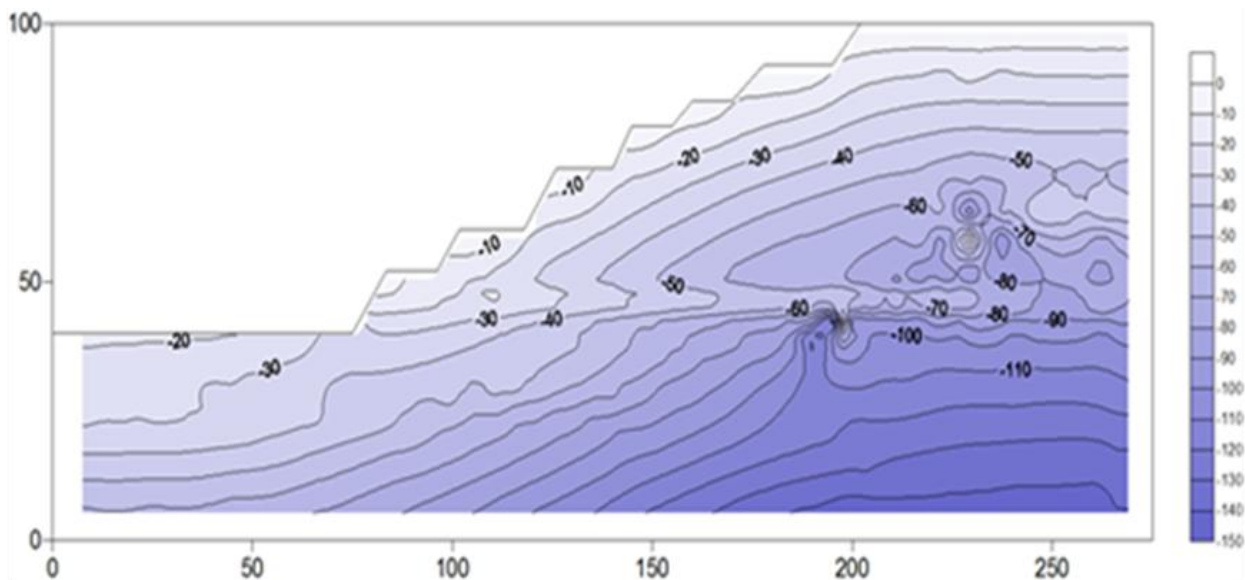
Фиг.4.11 Разпределение на деформациите на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“

- изолинии на напрегнатото състояние максималното срязващо напрежение (τ_{max}) на избрания профил на рудник Трояново-север (фиг.4.12);



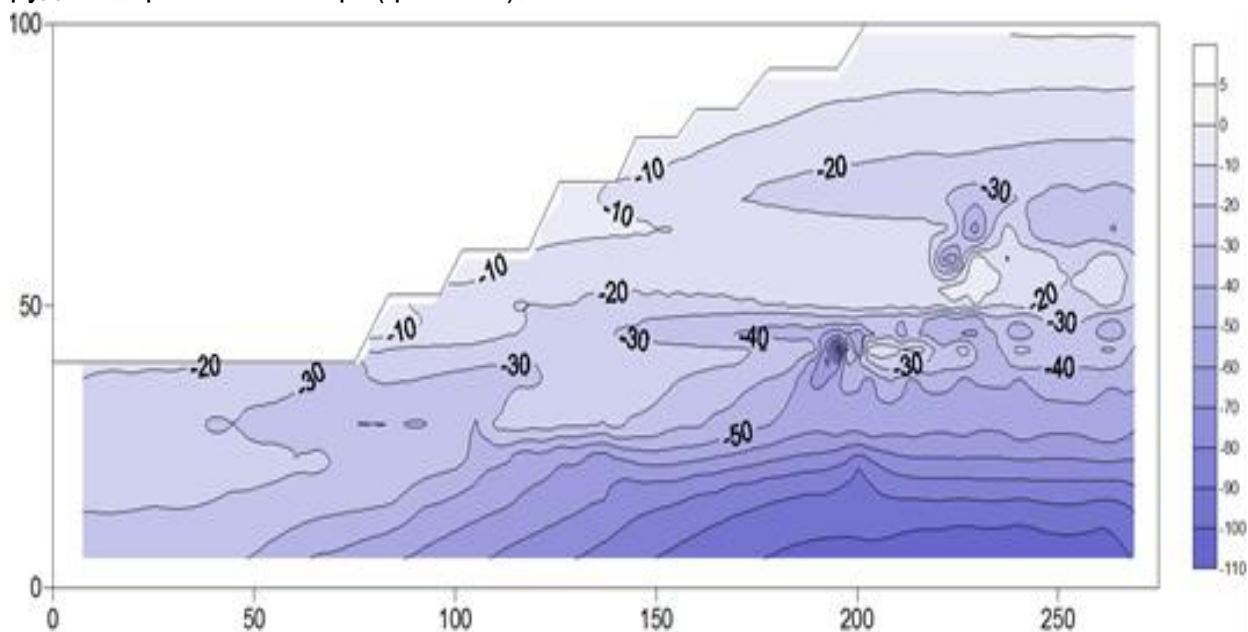
Фиг. 4.12 Изолинии на напрегнатото състояние (τ_{max}) на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“

- изолинии на напреженията (σ_1) на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“ (фиг.4.13);



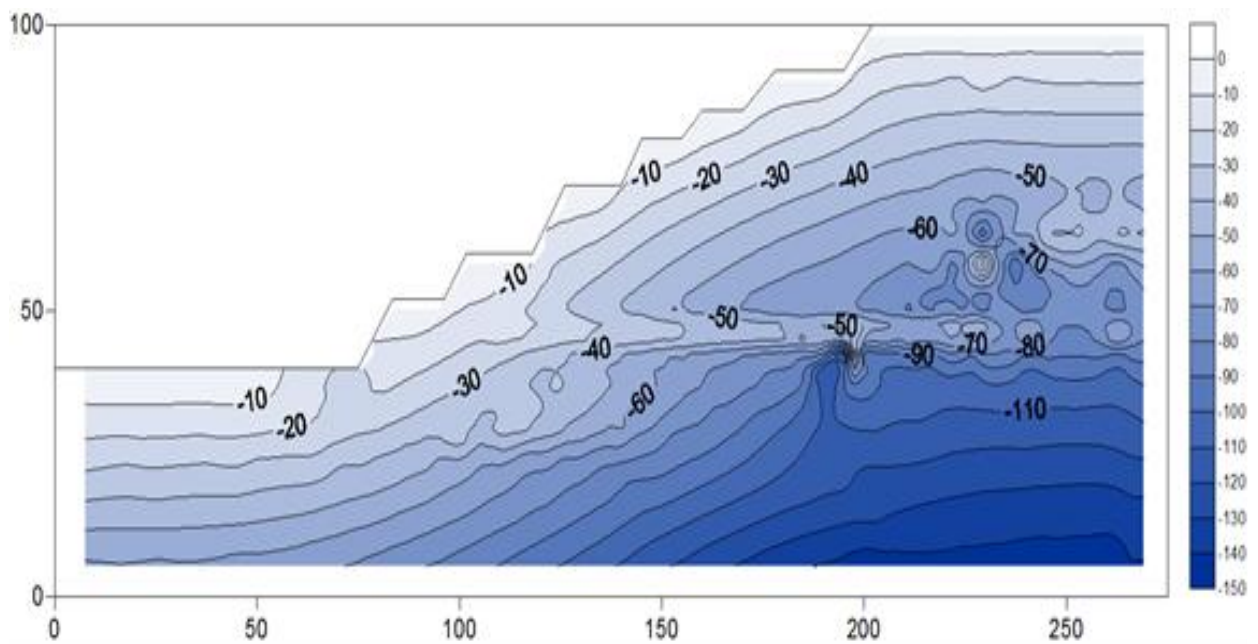
Фиг. 4.13 Изолинии на напреженията (σ_1) на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“

- изолинии на напреженията (σ_3) на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“ (фиг.4.14);



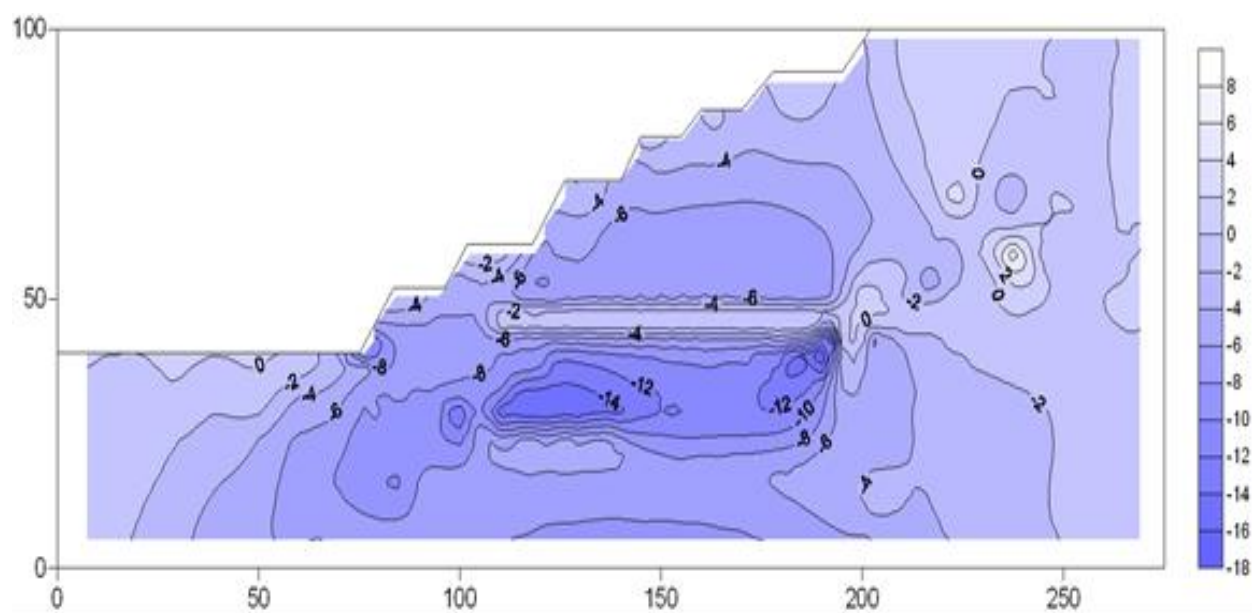
Фиг. 4.14. Изолинии на напреженията (σ_3) на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“

- изолинии на напреженията (σ_x) на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“ (фиг.4.15);



Фиг.4.15 Изолинии на напреженията (σ_y) на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“

- изолинии на напреженията (σ_y) изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“ (фиг. 4.16)



Фиг.4.16 Изолинии на напреженията (τ_{xy}) на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“

Оценката на степента на сигурност срещу загуба на устойчивост на естествени склонове и строителни откоси, извършвана по класическите (конвенционални) методи, се свежда до определяне на обобщения коефициент на сигурност при разрушение по предварително зададен модел на разрушение – в случая плъзгателна повърхнина (най-често права, кръгово-цилиндрична или произволно зададена в

съответствие с конкретните теренни условия). Коефициентът на сигурност, представляващ отношението на задържащите към активните (плъзгащите) сили или моменти, дава оценка за стабилитета на склона (изкопа) за частния случай на разрушение по точно приетата плъзгателна повърхност. За да се изследва цялостно проблемът, е необходимо да се изследват всички възможни форми на разрушение. Полученият минимален коефициент на сигурност се сравнява с нормативно зададената допустима стойност.

Анализът на устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново-север“ е извършен въз основа на принципа напрежение-деформация на МКЕ. Получените резултати за коефициента на устойчивост (F.O.S.) са представени в таблица 4.2, като са използвани якостните показатели според теорията на Mohr-Coulomb и следния формулен апарат:

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{li} + \sigma_{3i}}{2} + \frac{\sigma_{li} - \sigma_{3i}}{2} \cos 2\alpha_i, \quad (4.89)$$

$$\tau_i = \frac{\sigma_{li} - \sigma_{3i}}{2} \sin 2\alpha_i, \quad (4.90)$$

$$F.O.S. = \frac{\sum \left[\sigma_i L_i - \gamma w (H w_i + H w_i + 1) \frac{Dr}{2} L_i \right] + g \varphi_i + C_i L_i}{\sum \tau_i L_i}. \quad (4.91)$$

Таблица 4.2

Коефициенти на устойчивост на работния борд на рудник „Трояново север“, Мина „Марица-изток“ АД

Коефициент на устойчивост F.	Решение с МКЕ F.O.S.	Класически методи	
		Janbu	Sarma
	1,39	1,37	1,38

Анализът на резултатите за коефициента на устойчивост на работния борд на рудник „Трояново-север“ показва, че класическите методи за оценка на устойчивостта са малко по-консервативни в сравнение с числените методи, т.е. получените коефициенти на устойчивост по метода на Janbu (F=1,37) и метода на Sarma (F=1,38) са незначително по-ниски от този, получен по МКЕ (F=1,39)

4.4. Приложение на ANSYS програма за оценка на устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново-север“

Вторият подход, наречен SRM (strength reduction method), е предложен от Zienkiewicz (Зиенкевич) през 1975 г. Основава се на намаляването на якостта на срязване и представлява дискретен начин на изчисление. Основният принцип е намаляването на якостта на срязване и комбинираното прилагане на теорията на граничното равновесие и теорията на крайните елементи. Най-напред се започва с начални стойности на параметрите на якостта на откоса, след което се променят тези стойности на параметрите и се получава една нова група параметри на якост. Тези

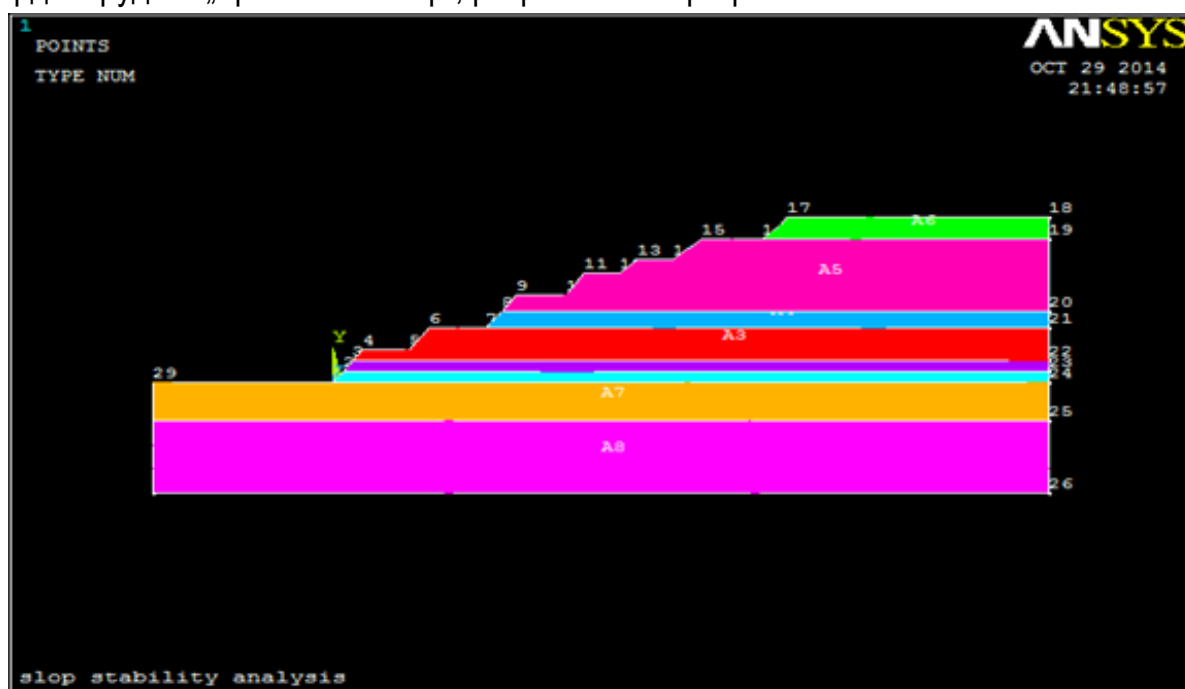
нови стойности се приемат за входни параметри при изчисление с метода на крайните елементи. Извършва се анализ на получените стойности и на характера на изменението им до получаване на стойност, при която откосът е в гранично равновесие. Тази стойност на якостния параметър се приема за най-малкия коефициент на устойчивост в този момент. За разлика от класическите методи за решаване на устойчивост, при МКЕ коефициентът на сигурност $F_{S_{MKE}}$ има смисълът на отношение между якостните параметри на почвата и стойностите им, при които те съответстват точно на гранично равновесие. (Тези стойности за φ и c - φ_k и c_k нататък ще се наричат критични). Дефиницията се представя с равенството:

$$F_{S_{MKE}} = \frac{\text{tg} \varphi}{\text{tg} \varphi_{cp}} = \frac{c}{c_{cp}} \quad (4.92)$$

Отново се изследва изчислителен профил на работния борд на рудник „Трояново-север“ (фиг.4.8). За физичните свойства и якостните показатели на масива на работния борд на рудник „Трояново-север“ са използвани данните, представени в таблица 4.1.

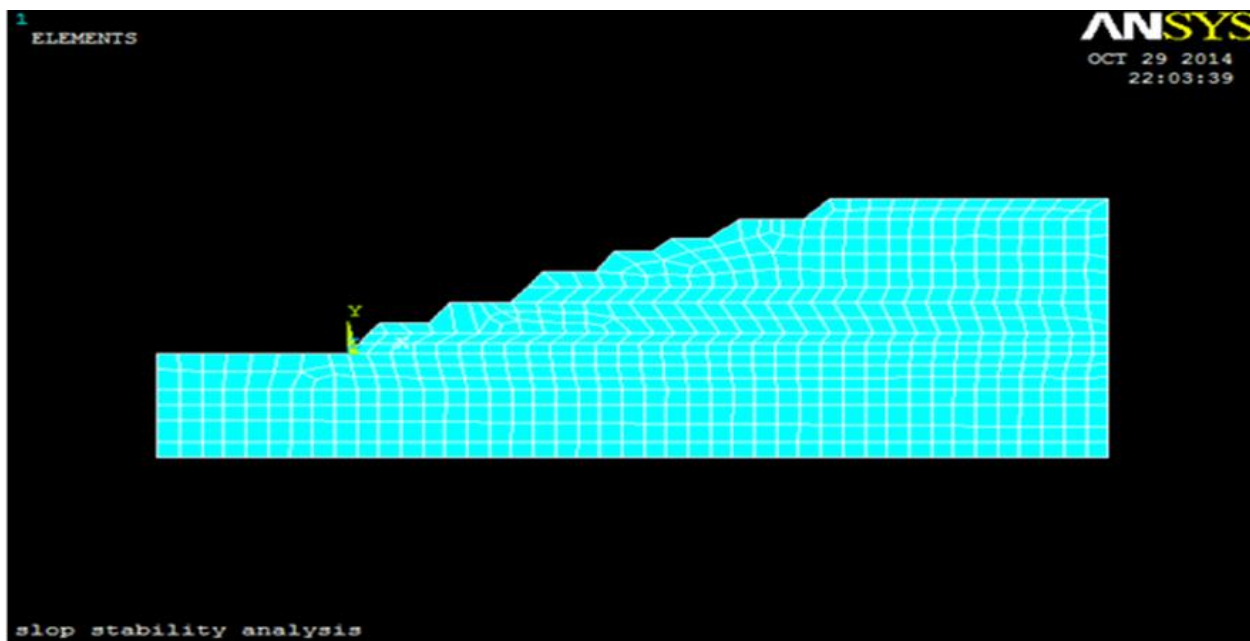
Масивът е нееднороден, при което за всяка литоложка разновидност са ползвани данни за кохезията c [kPa], ъгъла на вътрешно триене φ [...°], обемното тегло γ [kN/m³], коефициента на Поасон ν и модул на обща деформация E [kPa]. Височината на откоса, съгласно схемата на фигура 4.8, е 80m. Изчисленията за оценка на устойчивостта на борда на рудника са извършени със специализираната програма ANSYS. Успоредно с това за съпоставителен анализ ще бъдат използвани класически решения с използване на програмата SlopeStabBG и ОТКОС.

На фигура 4.17 е представен модела на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“, разработен с програмата ANSYS.



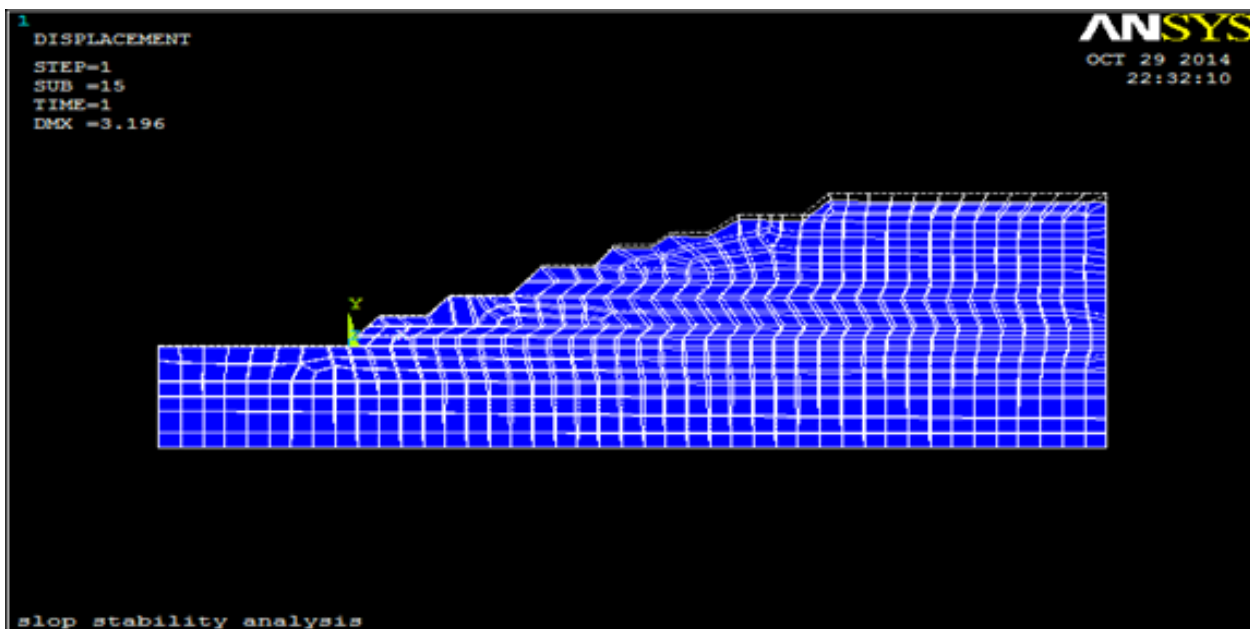
Фиг.4.17 Модел на изчислителния профил на работния борд на рудник „Трояново-север“

На фигура 4.18 е представена дискретизацията на елементите от работния борд на рудник „Трояново-север“.



Фиг.4.18 Схема на дискретизация на работния борд на рудник „Трояново-север“

Първоначално откосът се изследва за конкретните параметри, характеризиращи масива, т.е за $F_{S_{MKE}} = 1$ (с, кРа и ϕ, \dots°). Получените резултати за възникналите премествания и деформации в масива са показани на фиг. 4.19.

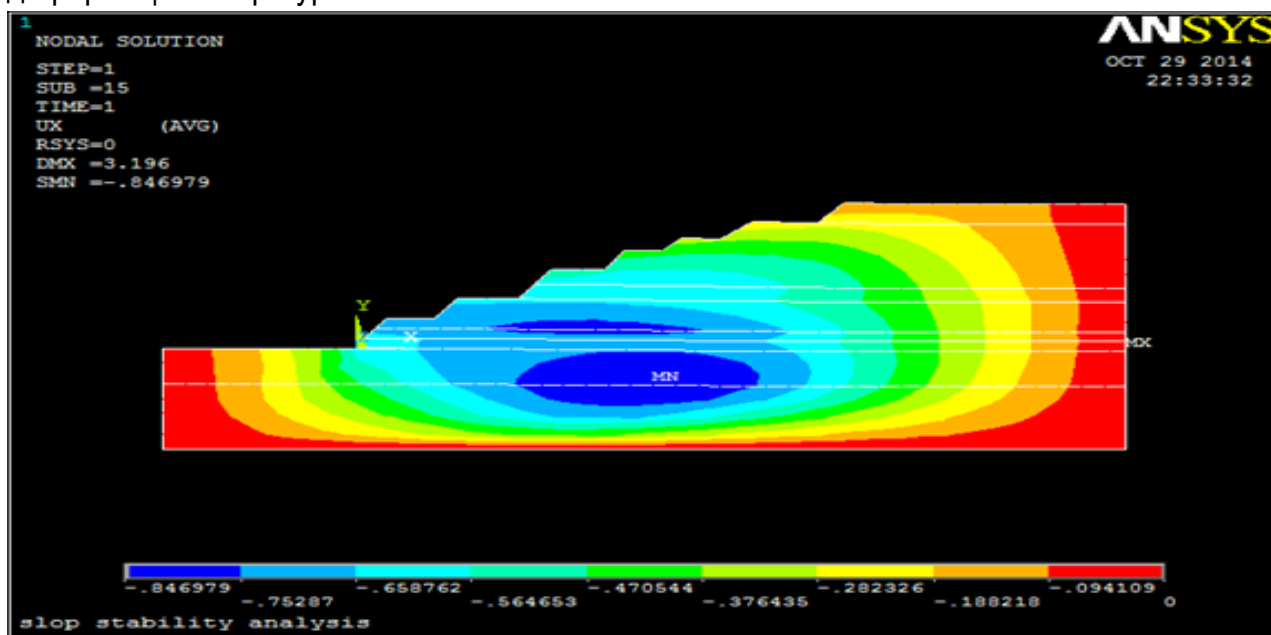


Фиг.4.19 Разпределение на деформациите на работния борд на рудник „Трояново-север“

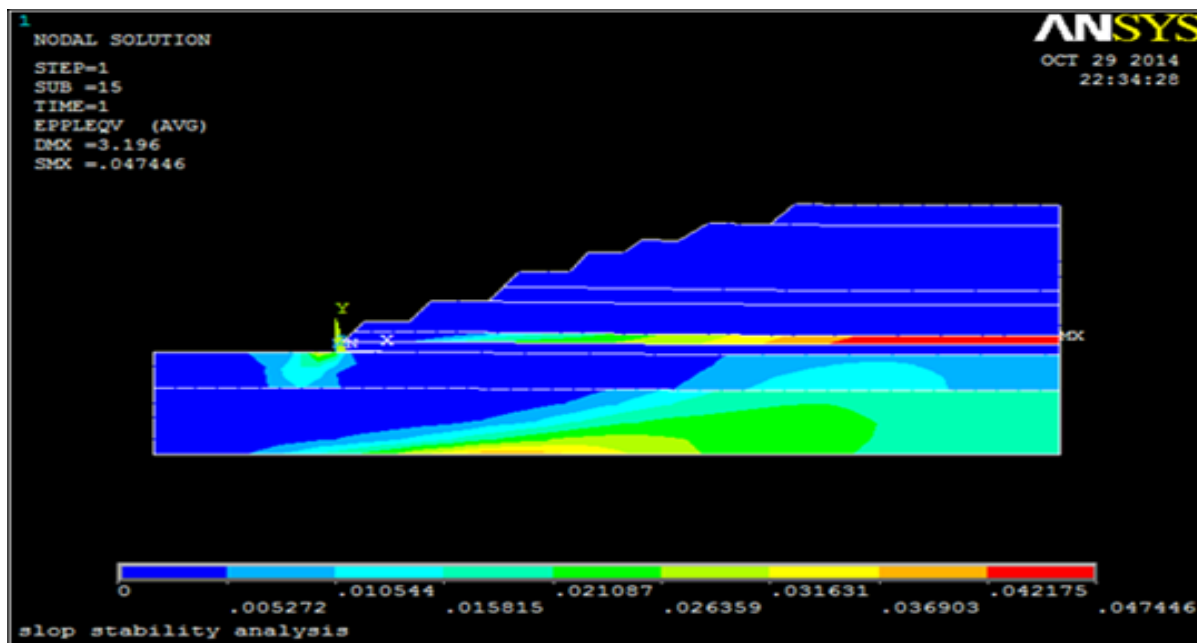
При проведеното изчисление се получава устойчиво крайно решение. От фигура 4.19 се установява, че зоната с максимално процентно нарастване на срязващите деформации в масива, очертаваща критичната плъзгателна повърхнина, обхваща само част от вътрешността на откоса. Това означава, че при приетият коефициент на сигурност $F_{S_{MKE}} = 1$, откосът е устойчив. За да се определи точната стойност на коефициента на сигурност, която както вече стана ясно, е по-голяма от единица, редуцираме якостните параметри c и ϕ , като за конкретния пример за F_S са приети стойности от 1 до 1,8 (табл.4.3).

На фигура 4.19 са обобщени получените резултати за нарастващите срязващи деформации за $F_{S_{MKE}} = 1$; $F_{S_{MKE}} = 1,2$; $F_{S_{MKE}} = 1,4$; $F_{S_{MKE}} = 1,6$; и $F_{S_{MKE}} = 1,8$. От тях се вижда, че с нарастване на коефициента на сигурност, респективно намаляване на якостните параметри, зоната, описваща процентно нарастване на срязващите деформации, все по-точно се доближава до ясно обособена плъзгателна повърхнина, близка по вид до залегналата в класическите теории за устойчивост на откоси. Процедурата продължава до параметри (определени чрез $F_{S_{MKE}}$), при които не може да се намери устойчиво крайно решение. Така полученият коефициент на сигурност, представлява „МКЕ коефициентът“ на сигурност $F_{S_{MKE}}$.

Преместванията по оста x на изчислителния профил на работния борд на рудник «Трояново-север» са представени на фигура 4.20, а диаграмата на пластичните деформации на фигура 4.21.



Фиг.4.20 Премествания по оста x на изчислителния профил на работния борд на рудник «Трояново-север»



4.21 Диаграма на пластичните деформации на работния борд на рудник „Трояново-север“

За извършване на съпоставителен анализ на резултатите от оценката на устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново-север“ с програмата ANSYS е разработен аналогичен модел със софтуерния продукт Slope 2004 при същите условия. За оценка на устойчивостта на борда са приложени класическите методи. Програмата дава възможност за решаване на задачата по един от следните конвенционални методи: Fellenius, Bishop, Janbu. Решаването на задачата с помощта на класическите методи се базира на предпоставката за приета форма на плъзгателната повърхнина (най-често кръговоцилиндрична) и прието разпределение на напреженията по тази повърхнина. Това прави задачата статически определима и тя се решава посредством обикновените статически уравнения.

В таблица 4.4. са посочени стойностите на коефициента на устойчивост на работния борд на рудник «Трояново-север», определени чрез МКЕ и класическите методи.

Таблица 4.4

Коефициенти на устойчивост на работния борд на рудник «Трояново-север»

Минимален коефициент на устойчивост $F_{S_{min}}$	Решение с МКЕ	Класически методи		
		Fellenius	Bishop	Janbu
	1,4	1,38	1,43	1,36

Таблица 4.3

Коефициенти на сигурност (ANSYS), използвани за литоложките разновидности от работния борд на рудник „Трояново-север“

II и III въглищен пласт. Ас = 30 %			Междупластие (сиво – зелени мазни глини)			Черни глини			Синьо - зелени глини			Прахово -песъчливи глини			Сиво - черни мазни глини			Сиво - зелени глини		
F _{SMKE}	C	Φ	F _{SMKE}	C	Φ	F _{SMKE}	C	Φ	F _{SMKE}	C	Φ	F _{SMKE}	C	Φ	F _{SMKE}	C	Φ	F _{SMKE}	C	Φ
1	0.340	11.0	1	0.075	1.0	1	0.203	15.0	1	0.130	6.0	1	0.140	20.0	1	0.100	3.0	1	0.120	3.0
1.2	0.283	9.2	1.2	0.063	0.8	1.2	0.169	12.6	1.2	0.108	5.0	1.2	0.117	16.9	1.2	0.083	2.5	1.2	0.100	2.5
1.4	0.243	7.9	1.4	0.054	0.7	1.4	0.145	10.8	1.4	0.093	4.3	1.4	0.100	14.6	1.4	0.071	2.1	1.4	0.086	2.1
1.6	0.213	6.9	1.6	0.047	0.6	1.6	0.127	9.5	1.6	0.081	3.8	1.6	0.088	12.8	1.6	0.063	1.9	1.6	0.075	1.9
1.8	0.189	6.2	1.8	0.042	0.6	1.8	0.113	8.5	1.8	0.072	3.3	1.8	0.078	11.4	1.8	0.056	1.7	1.8	0.067	1.7

Профил. F_{SMKE} – коефициент на сигурност; C -кохезия; Φ – ъгъл на вътрешно триене

Изводи:

При използване на решения по МКЕ (SSA) и (RSM) резултатите за коефициента на устойчивост не се различават съществено, но в голяма степен са преодолени описаните недостатъци на класическите методи. Тук, на базата на напрегнатото и деформирано състояние за целия масив се получава и възможност за разрушение на повече действителните повърхнини (аналогични на плъзгателните).

В заключение може да се каже следното:

1. Представените модели, изработени чрез компютърна програма, съставени въз основата на метода на крайните елементи, са приложими за условията на рудник «Тряново-север», мини «Марица-изток» АД.

2. Установеното напрегнато състояние в масива дава възможност да се посочат зоните с най-неблагоприятното разположение на главните напрежения (σ_1 и σ_3), по които могат да се очертаят рисковите места.

3. Профилите с изолинии на максималните срязващи напрежения са меродавни при тълкуване на поведението на скалния масив, привързан към минните работи или към макроструктурни дефекти в масива (разседи, макропукнатини и т. н.).

4. По разпределението на напреженията σ_1 и σ_3 може да се оптимизира положението и формата на вероятната плъзгателна повърхнина в работния борд на открития рудник и местата, в които могат да възникнат най-големи свлачищни деформации.

5. Работата със съвременни специализирани геотехнически програмни продукти, базирани на метода на крайните елементи, дава възможност за един по-различен подход при оценка устойчивостта на даден откос.

6. Резултатите от решенията с помощта на МКЕ (SSA) и (RSM) за коефициента на устойчивост на работния борд на рудник „Трояново-север“ не се различават съществено (до 5% разлика) от резултатите, получени чрез прилагане на класическите методи. Предимството на МКЕ се изразява в по-пълното отчитане на напрегнатото и деформирано състояние на масива, което при по-голяма част от конвенционалните методи е недостатък.

ГЛАВА 5. ПРИНЦИПНИ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ ИЗБОРА НА МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА РАБОТЕН БОРД И ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ТЕХНОЛОГИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ

5.1 Вземане на решение за технологично въздействие върху устойчивостта на работен борд в условия на неопределеност на природната среда

Проблемът при вземане на решения при планиране и управление, свързан с различни задачи от минната практика, се усложнява значително и поради влиянието на различни, случайни фактори.

Различни задачи от минната практика, в това число и управлението на устойчивостта на бордове и откоси (Георгиев, 1988), които са свързани по един или друг начин с неопределеност на използваната входна информация, могат да

обосноват своите решения с помощта на теориите на игрите и статистическите решения (Гичев и др., 1980; Резниченко, 1981).

Конкретна задача се разглежда като вид стратегическа игра с участието на две страни – проектантът (инженерът от производството) и Природата (Велев, 1988). Ролята на активния "противник" от теорията на игрите, който противодейства на нашите планове, в теорията на статистическите решения се изпълнява от обективната действителност, която е прието да се нарича Природа.

В началото на играта проектантът разполага с всевъзможни стратегии – $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$. Фактически те се явяват като стратегии на Природата.

Резултатът от играта, така наречената печалба T_{ij} , се получава при използването на варианта i и състоянието на Природата j . Решенията за всяка двойка стратегии се дава с платежната матрица $||T_{ij}||$ (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Π_j	Π_1	Π_2	...	Π_n
T_i	T_{11}	T_{12}	...	T_{1n}
T_2	T_{21}	T_{22}	...	T_{2n}
...
T_m	T_{m1}	T_{m2}	...	T_{mn}

Трансформирането към системата “технологично решение – природна среда”, стратегията ще включва от една страна варианти на технологични решения, а от друга – съвкупност от оценки за природната среда (оценки за стойностите на физико-механичните показатели на литоложките разновидности през различни периоди от време).

Често при решаване на такива задачи се използва и матрицата на риска. Той се дефинира (Резниченко, 1981) като разлика между максималната печалба при конкретно състояние на Природата β_j , т.е. печалбата, която би се получила ако беше известно точно състояние на Природата – точната стойност на един или група показатели, които характеризират масива (и печалбата при незнанието на тези условия и използването на стратегията T_i), т.е. някое от технологичните решения.

$$V_{ij} = \beta_j - T_{ij} \tag{5.1}$$

където $\beta_j = \max_i T_{ij}$

От вероятностния анализ за оценка на моментното състояние на V и VI откривни хоризонти (при фиксиран профил на борда) (фиг. 3.2) се вижда, че V откривен хоризонт е в по-неблагоприятно положение в сравнение с VI и е необходимо да се набележат конкретни мерки за повишаване на устойчивостта му. Формулираме следните възможни стратегии:

T_1 - запазване на съществуващото положение (виж фиг. 3.2);

T_2 - преснемане на нивото на V хоризонт с 4 метра от багер на VI хоризонт. Височината на V откривно стъпало (в околността на разглеждания профил с минимална устойчивост или проявили се деформации) от 15 метра става 11 метра;

T_3 - изземва се заходка със широчина 50 метра от багер на V-то откривно стъпало. Широчината на V откривен хоризонт се увеличава от 350 - 400 метра;

T_4 - на II възглицно стъпало се изземва с долно гребане заходка с широчина 30 метра, т.е. широчината на площадката би трябвало да бъде вместо 140 - 170 метра.

При тези предположения за технологична намеса, състоянието на природата би трябвало да се характеризира със съвкупностите от стойности на физико-механичните показатели на литоложките разновидности използвани през различни периоди от време (Христов, 1984), а именно:

P_1 - използвани в момента стойности на физико-механичните показатели

P_2 - показатели от 1990 г.;

P_3 - показатели от 1988 г.;

P_4 - показатели от 1986 г.

За приетите стратегии се съставя матрицата на печалбата (нарича се още таблица на ефективността – табл. 5.2) и чрез нея матрица на риска (табл. 5.3).

Таблицата на ефективността се попълва със стойностите за коефициента на устойчивост на V откривен хоризонт за всяка допустима комбинация $/T_i, P_j/$.

Анализът на таблицата на ефективността (табл. 5.3) показва, че решенията T_2 при стратегията P_1 е еквивалентно на решението T_3 при стратегията P_2 . Ефективността и в двата случая е почти еднаква (в рамките на точността на изчисленията). Анализът на тези решения с помощта на таблицата на риска показва, че рискът в двата случая не е еднакъв и е съответно 0 и 0,08. Разликата се обяснява с това, че решението T_2 при стратегията P_1 достига максимално възможната ефективност (1,38/; решението T_3 при стратегията P_2 постига цялата възможна ефективност – 1,39 от възможната 1,47. Следователно, от гледна точка на риска, решението T_2 при стратегията P_1 е по-добре от решението T_3 при стратегията P_2 .

Таблица 5.2

$T_i \backslash P_j$	T_1	P_1	P_2	P_3	P_4	α_i
T_1		1,21	1,33	1,82	1,91	1,21
T_2		1,38	1,47	2,03	2,13	1,38
T_3		1,28	1,39	1,89	1,99	1,28
T_4		1,23	1,35	1,86	1,95	1,23
β_j		1,38	1,47	2,03	2,13	

Таблица 5.3

$T_i \backslash P_j$	P_1	P_2	P_3	P_4	γ_i
T_1	0,17	0,14	0,21	0,12	0,21
T_2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T_3	0,10	0,08	0,14	0,04	0,14
T_4	0,15	0,12	0,17	0,08	0,17

В условията на неопределеност на инженерно-геоложката информация, изборът на най-добро решение зависи от това, до каква степен познанията ни за нея отговарят на действителността. Възможни са три подхода (*Резниченко, 1981*):

- Вероятностите P_1, P_2, \dots, P_n на възможните стратегии P_j са известни.

В този случай се избира решение, за което сумата от произведението на стойностите на печалбата и съответната вероятност по редове в таблицата на ефективността е максимална, т.е.

$$T_i = \sum_{j=1}^n P_j T_{ij} \rightarrow \max \quad (5.2)$$

- Вероятностите P_1, P_2, \dots, P_n на възможните стратегии P_j са неизвестни, но чрез метода на експертните оценки (метод “делфи”) (*Мойсеев, 1977*), могат да бъдат посочени ориентировъчни стойности за вероятността на стратегията P_j ;

- Вероятностите P_1, P_2, \dots, P_n или не съществуват или не се поддават дори на приблизителна оценка.

По наше мнение, този случай е най-близко до условията в минната практика и по-специално при стабилитетните изчисления.

За вземане на решения в такива случаи са разработени няколко критерия:

1. Критерий на А. Валд, при който като най-добра се счита тази стратегия, при която се реализира печалба във всеки случай и се получава от условието:

$$\alpha_i = \max_i \min_j T_{ij} \quad (5.3)$$

Тази “песимистична” стратегия допуска възможността за появяване на най-неблагоприятните условия.

В таблица 5.2 се намират минимумите на получените стойности за коефициента на устойчивост и се записват в последната колона (за α_i). Избира се тази стратегия, при която минимума е максимален. За конкретния случай той е 1,38; т.е. най-удачно е да се избере стратегията T_2 при допускане за стратегията P_1 .

2. Критерий на Севидж, който също е “песимистичен”, но при избора на решение се излиза от позициите на риска. Избира се тази стратегия, при която стойността на риска при най-тежките условия е минимална, т.е.: налице е условието:

$$s_i = \min_i \max_j \gamma_{ij} \quad (5.4)$$

Целта е да се избегне големия риск при вземане на решението.

При анализиране на вероятните възможности за предлагане на решение, съгласно този критерий се използва таблица 5.3 със стойностите на риска. В последната колона (за γ_{ij}) се нанасят максималните стойности на риска по редове. Избира се стратегията, при която риска е минимален. За разглежданата ситуация той е 0, т.е. отново се потвърждава правилността на избора $T_2 - P_1$;

3. Критерият на Хурвиц възприема среден подход между разгледаните до сега. Съгласно този критерий, решението се намира от условието:

$$H_i = \max_j \left\{ \mu \min_i T_{ij} + (1 - \mu) \max_j T_{ij} \right\} \quad (5.5)$$

Където μ е коефициентът на песимизъм и се избира между 0 и 1. Изборът му е по чисто субективни съображения - колкото разглежданата ситуация е по-опасна и е необходима сигурност, толкова неговата стойност трябва да е по-близо до 1. Приемаме $\mu=0,6$ и съставяме таблица 5.4. В тази таблица се прибавят три допълнителни колони за: минимума на реда α_i , максимума на реда β_i , и величината $\gamma_i = \mu\alpha_i + (1 - \mu)\beta_i$.

Таблица 5.4

T_i P_j	P_1	P_2	P_3	P_4	α_i	β_i	γ_i
T_1	1,21	1,33	1,82	1,91	1,21	1,91	1,49
T_2	1,38	1,47	2,03	2,13	1,38	2,13	1,68
T_3	1,28	1,39	1,89	1,99	1,28	1,99	1,56
T_4	1,23	1,35	1,86	1,95	1,23	1,23	1,52

При сравняване на получените резултати се вижда, че максималната стойност $\gamma_i = 1,68$ отговаря на стратегията T_2 .

От направените досега изчисления се вижда, че и трите критерия дават предпочитание на предложението за решение T_2 .

От получените до тук резултати, могат да бъдат формулирани следните по-важни изводи :

1) Обоснована е необходимостта от използването на съвременни високо ефективни математически методи за изследване и успешно е приложена теорията на

статистическите решения при избор на технологичен вариант за въздействие в условията на неопределеност върху устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново–север“, мини „Марица-изток“ АД.

2) Основният критерий, по който се осъществява избора на технологично решение е рискът. Същият се изчислява за всяка двойка от варианти и е непосредствено зависим от използваната входна инженерно-геоложка и технологична информация.

3) Преснемането на нивото на откривните хоризонти се потвърждава като един от ефективните начини за бързо въздействие върху устойчивостта на работен борд.

4) Използването на теорията на статистическите решения открива широки възможности за многовариантни комбинации между природни и технологични фактори. При това е възможно участието, както на съвкупности от конкретни показатели, така и на отделни техни представители.

5.2 Вземане на решения за технологично въздействие върху устойчивостта на работните бордове в открити рудници при отчитане на фактора време

Според Г. Георгиев (1981) “управление на устойчивостта на борд или откос се осъществява само тогава, когато чрез получени от технически средства или от инструментални наблюдения данни за началото на деформационен процес се предприемат обосновани от прогнозата за развитие на процеса действия, които позволяват поддържането на последния в предварително определени граници”.

Начини за предотвратяване или ограничаване на деформационния процес, в зависимост от вида на борд (работен или неработен) са добре известни и изпитани в практиката. При неработните бордове това се постига с интензивно подсилване на същите (стигащо дори до засипване на въглища), като по какъв начин максимално се съкращава разстоянието между фронта на откривните и насипищни работи. Въздействието върху деформационния процес при работните бордове се свежда до неизземване на заходки от въглища и разтоварване на масива в околност на профили, където е констатирано движение .

По-важните начини за управление развитието на минните работи в откритите рудници са:

1) Оптимизиране на минните работи посредством изменение на направлението и скоростта на придвижване на работния фронт в зависимост от минно-геоложките и хидрогеоложките условия.

2) Изменение конструктивните параметри на стъпалата и бордовете;

3) Поетапно разработване на находищата. Оставяне на временни неработни бордове;

4) Намаляване действието на взривната вълна върху скалния масив, намиращ се зад контура на рудника;

5) Отводняване на работните и неработните бордове;

6) Заздравяване на скалите, изграждащи стъпалата и бордовете;

7) Управляемо обрушване на откосите на високи стъпала.

Управлението на минните работи е комплексна задача, решаването на която изисква квалифицирани специалисти – инженер-геолози, маркшайдери и технолози-геомеханици.

5.3 Мероприятия за технологично въздействие върху устойчивостта на откосите и бордовете в открити рудници

5.3.1 Общи положения

Разработването на мероприятия за технологично въздействие върху устойчивостта на откосите и бордовете в откритите рудници се извършва въз основа на резултатите от наблюденията за деформациите в масива, оценката на устойчивостта и съответните технико-икономически изчисления и съображения.

Обезпечаването на устойчивостта на откосите, изградени от глинести и пясъчливо-глинести литоложки разновидности се изразява предимно в ефективно отвеждане на повърхностните и подземните води, осигуряване на повърхностния отток, създаване на филтрационни участъци в откоса. Тези мероприятия са свързани предимно с изграждане на оптимална дренажна система.

Мероприятията за технологично въздействие върху устойчивостта на откосите трябва да бъдат съобразени с:

- очакваните деформации в откосите и бордовете на рудника;
- очакваните щети от тези деформации;
- най-целесъобразните мерки за предотвратяване на деформациите;
- разходите за изпълнение на противодеформационни мероприятия и технико-икономическа обосновка на предвидените мероприятия.

5.3.2 Преоткосиране на стъпалата до граничното им положение

Преоткосирането на стъпалата до граничното им положение се извършва под ъгъл, съответстващ на физико-механичните свойства на скалите, характера на тяхната прекъснатост (напуканост) и това е едно от основните мероприятия за осигуряване на дълговременна устойчивост на неработните бордове или техни участъци, намиращи се в гранично състояние.

Преоткосирането на стъпалата до граничното им положение зависи от конкретните инженерно-геоложки условия:

а) в скални и полускални масиви се използват специални взривни сондажи с диаметър 80 – 100 mm, разстоянието между които се изчислява по опитен път за всеки конкретен случай.

б) в слаби глинести и пясъчливо-глинести литоложки разновидности преоткосирането се извършва с наличната изкопно-товарна механизация.

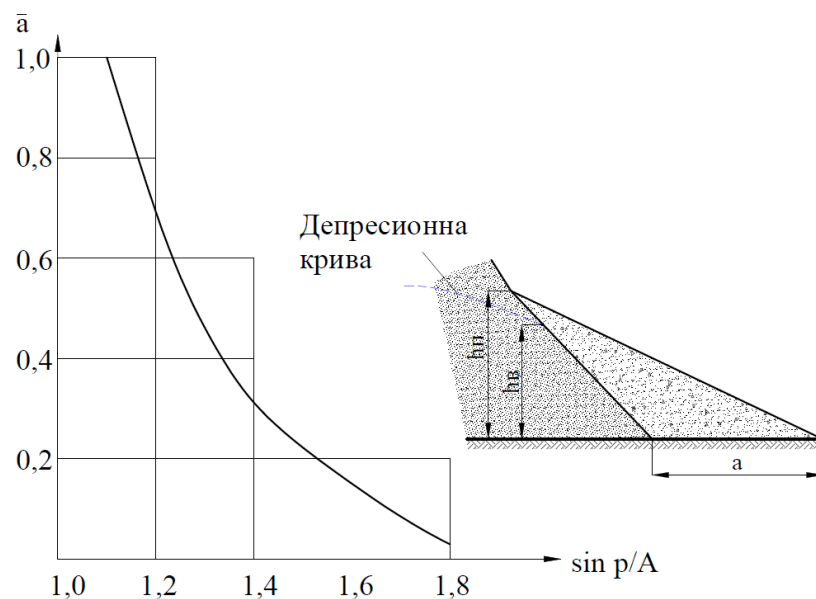
5.3.3 Укрепване на слаби участъци в откосите и бордовете на откритите рудници

Необходимостта от укрепване на слаби участъци в откосите и бордовете на откритите рудници е продиктувана от следните условия: наличие на интензивна напуканост в скални и полускални разновидности, неблагоприятно разположение на

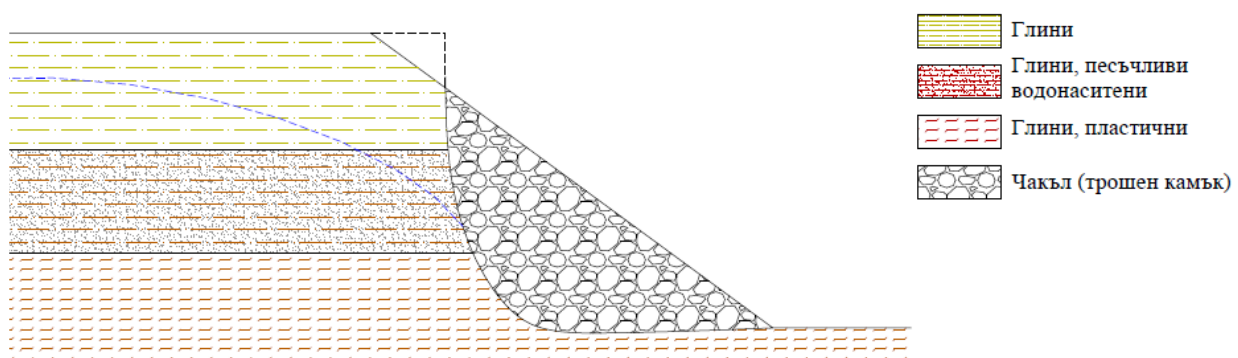
пукнатините, дизюнктивни нарушения, слаби контакти между слоевете. За укрепване на скални и полускални откоси могат да се приложат следните мероприятия:

- а) методи за механично укрепване на призмата на възможното обрушване;
- б) методи, повишаващи якостните характеристики на масива чрез инжектиране на заздравяващи разтвори
- в) методи с изолиращи покрития – прилагат се за откоси, изградени от скали склонни към бързо и интензивно изветряване, напукване или пропадане.

Филтрационните участъци на откосите, изградени от пясъчливо-глинести и глинести литоложки разновидности се укрепват с помощта на трошено-каменна засипка. На фигури 5.1 и 5.2 са представени схема на изграждане на опорна призма и схема на засипване на пясъчливо-глинест филтрационен откос.



Фиг.5.1 Схема на изграждане на опорна призма



Фиг.5.2 Схема на засипване на пясъчливо-глинест филтрационен откос

За предотвратяване от ерозия, откосите изградени от пясъчни и пясъчливо-глинести скали трябва да се покриват с растителен слой или да се затревяват. Предотвратяването на размиването и ерозията на пясъчливо-глинести откоси, по които се стичат дъждовните води се постига чрез устройването на водостоци и

оставянето на хоризонтални площадки. За целта бермите се формират с едностранен напречен наклон (3-5%) и напречни канавки, в които са положени стоманобетонни тръби за отвеждане на водите към долулежащите площадки.

5.3.4 Обезпечаване на общата устойчивост на бордовете в откритите рудници и насипищата

Нарушаване на общата устойчивост на значителни участъци от бордовете на откритите рудници или насипищата настъпва в случаите, когато движещите сили, действащи по най-слабата повърхнина са по-големи или равни на задържащите сили, т.е. при условие на гранично равновесие.

Ако причината за възникване на деформации в голяма част от борда на рудника е несъответствието между ъгъла на откоса или неговата височина (например, при увеличаване на общата дълбочина на рудника вследствие на западане на пластовете или при задигане на земната повърхност) с геоложките условия, то тогава е необходимо да се придаде на борда по-полегат ъгъл на генералния откос.

Ако при аналогични условия на деформации в бордовете на открития рудник е установено наличието на напорни водоносни хоризонти в основата, то тогава първото мероприятие за предотвратяване на развитието на деформации е намаляване или отстраняване на хидростатичния или хидродинамичния напор.

Ако факторите, оказващи съществено влияние върху развитието на опасни (неизбежно водещи към обрушване и свличане) деформации в голяма част от борда на рудника са локални неблагоприятно залягащи нарушения в масива (тектонски нарушения, потенциални повърхнини от древни свлачища, контактите между литоложки разновидности и др.), то в този случай мероприятията за технологично въздействие са с локален характер:

- а) разтоварване на призмата на активен земен натиск в границите на участъка, ограничен от повърхнините на отслабване;
- б) изграждане на опорни призми;
- в) създаване на контрафорси и предпазни валове.

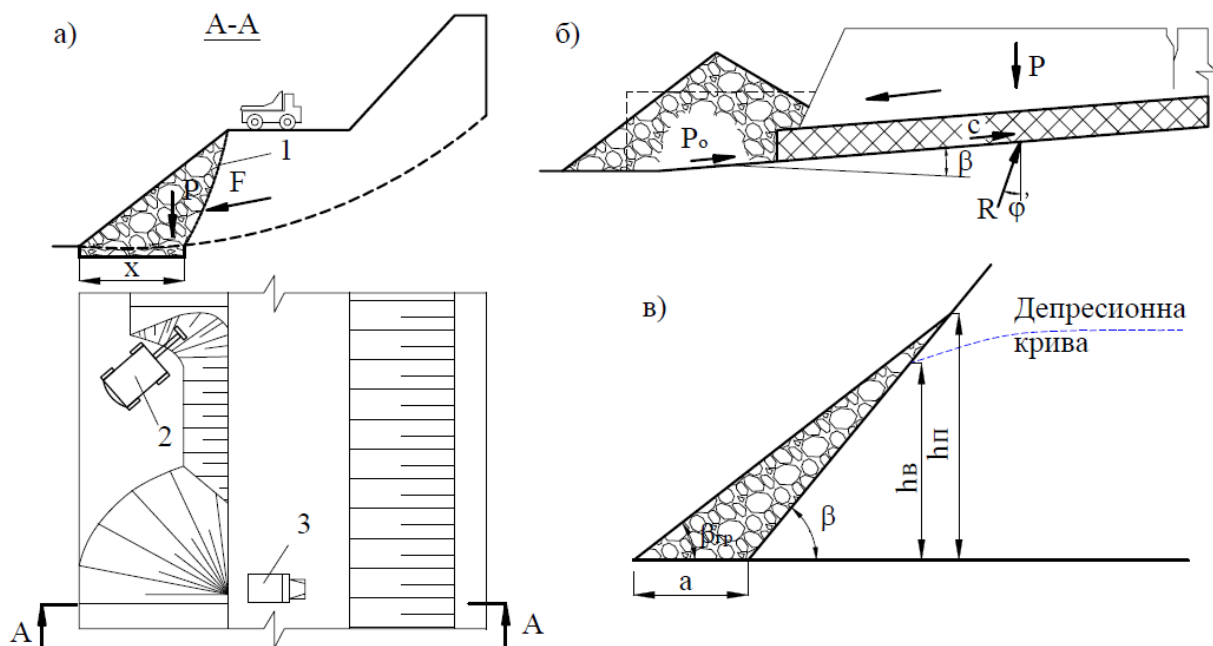
В редица случаи, опасните деформации на големи участъци от бордовете на откритите рудници, стъпалата и насипищата, са предизвикани от оводнеността на земната повърхност, площадките (работни, транспортни и предпазни), дъното на открития рудник и основата на насипищата. Основното мероприятие за предотвратяване на деформации при тези условия е своевременното отвеждане на водите от земната повърхност в прилежащите територии на открития рудник и осигуряване на оттичането на водите от откритите минни изработки и насипищата.

5.4 Избор на ефективни инженерно-технически мероприятия за въздействие върху устойчивостта на бордовете в реални условия

Изборът на инженерно-технически мероприятия зависи от тяхното целево предназначение и инженерно-геоложките условия на участъка от работния борд в открития рудник.

За защита на масива от въздействието на взривванията на скални и полускални разновидности във въглищни находища е необходимо да се прилага контурно взривяване по специални технологии, диагонални схеми на свързване на зарядите в мрежата, милисекундно взривяване и разсредоточени заряди.

Подсипването на борда (стъпалото) чрез изграждане на контрафорс от здрави скали се препоръчва за повишаване на устойчивостта на откоси, склонни към свличане (фиг.5.3).



Фиг.5.3 Схема на повишаване устойчивостта на откоса чрез подсипване:

а) последователност на насипване на контрафорс (1) с автосамосвали (3) в багерната заходка (2); б) временно подсипване на работния борд; в) подсипване на оводнено стъпало с филтрационен материал

Изводи:

Изборът на подходящ метод за оценка на устойчивостта на работния борд на открит рудник се основава на вземането на решения често пъти в условията на неопределеност на природната среда. Преодоляването на този проблем може да стане чрез използването на съвременни високо ефективни математически методи за изследване. Това се доказва от приложената теория на статистическите решения при избор на технологичен вариант за въздействие в условията на неопределеност върху устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново–север“, мини „Марица-изток“ АД. Като основен критерий е използван риска при избора на технологично въздействие върху устойчивостта на работния борд.

Предложените принципни мероприятия за технологично въздействие върху устойчивостта на работните бордове в открити рудници намират конкретно приложение за бързо въздействие върху устойчивостта на работен борд, т.е. необходимост от преснемане на нивото на откривните хоризонти за условията на рудник „Трояново-север“, Мини „Марица-изток“ АД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящият дисертационен труд е научно обобщение на теоретичните и методологичните изследвания на автора. Основните резултати на дисертационния труд се изразяват в следното:

1. Формулиране на теоретичните основи за оценка на устойчивостта на откосите в откритите рудници

Основа за оценка на устойчивостта на откосите в откритите рудници е научно-приложната база на геомеханиката. Въз основа на нея са определени следните понятия:

- Обект и предмет на изследване и оценка;
- Фактори, влияещи върху устойчивостта на откосите;
- Механизъм на свлачищните процеси и явления;
- Динамика на развитие на свлачищни процеси;
- Прогнозиране на устойчивостта на откосите.

Прогнозната оценка на устойчивостта на откоса е представена със зависимостта на коефициента на устойчивост от закономерното изменение на един или друг параметър, оказващ влияние върху стабилитета.

2. Разработена е актуална, съответстваща на съвременните изисквания класификация на методите за оценка на устойчивостта на откосите

Като основен признак е използван механо-математическия подход за решаване на задачите.

Комплексното приложение на съвременните методи, основани на различни принципи, оценката на тяхната сходимост, позволява значително да се повиши достоверността на моделирането на устойчивостта на откосите.

3. Обосновано е приложението на 3D моделирането при оценка на устойчивостта на откосите въз основа на методите на граничното равновесие

Опитът от 3D моделирането за оценка на устойчивостта на откосите с методите на гранично равновесие показва, че:

- Получените в резултат на триизмерното моделиране коефициенти на устойчивост по-големи от аналогичните коефициенти, получени при решаване на равнинната задача.

- Пространственото положение на най-опасната повърхнина на плъзгане зависи от размерността на решаваната задача. При преминаване от равнинна постановка на задачата към обемна, се изменя концепцията на описание на плъзгателната повърхнина. В обемната задача тя се моделира във вид на сегмент от елипсоидна повърхнина. Кръговоцилиндричната повърхнина на плъзгане при оценка на устойчивостта в равнинната задача няма аналог. От гледна точка на механиката, разглежданата задача, не може да се счита за равнинна и като следствие не може коректно, без съществени допускания да се реши двумерната постановка.

Така също е установено, че при обемните задачи, основани на методите на граничното равновесие, съществуват редица ограничения:

- Тимерните методи за анализ са числено по-малко устойчиви в сравнение с двумерните изчисления.

- При 3D моделирането на устойчивостта на откосите с методите на гранично равновесие, неопределеността на силите, които действат на границата на ламелите, се разпространяват не в едно а в две направления. По този начин, получените в резултат разлики между 2D и 3D изчисленията частично ще определят използваните зависимости между тези сили.

4. Обосновани са перспективни подходи за оценка и прогнозиране на устойчивостта на откоси като: оптимизиране на плъзгателната повърхнина, вероятностен анализ и анализ на чувствителността на методите и съвременни модели за поведението на скалния масив и якостните критерии

Прилагането на алгоритъм за оптимизиране плъзгателната повърхнина позволява съществено да се повиши надеждността на получените резултати.

Моделирането на устойчивостта на откосите с оптимизиране на плъзгателната повърхнина показва, че разликите в коефициента на устойчивост F , получени при кръговоцилиндрична повърхнина и оптимизирана повърхнина на плъзгане са в диапазона до 10%, но в някои случаи могат да достигнат и 30%.

По този начин, изчисленията с методите на гранично равновесие при кръговоцилиндрична повърхнина на плъзгане в нееднородни откоси може да се разглеждат само като предварителни, а получените коефициенти на устойчивост ще бъдат завишени. Задачата за определяне на формата на най-опасната повърхнина на плъзгане не може да се смята за завършена, ако не е оптимизирана плъзгателната повърхнина.

Вероятностният анализ позволява да се извърши анализ на устойчивостта на откосите по-универсално от друга гледна точка. Показателно е, че при него е възможно да се установят случаи, при които откос с по-висок коефициент на устойчивост има по-голяма вероятност от развитие на свлачище или обрушаване в сравнение с откос с по-ниска стойност на коефициента на устойчивост. Вероятностният анализ оказва влияние върху оценката на устойчивостта на откосите като изследва поведението на един или няколко фактора.

Анализът на чувствителността позволява да се извърши прогнозиране на изменението на коефициента на устойчивост в зависимост от закономерното изменение на един или няколко параметъра.

Съвместното използване на вероятностния анализ и анализа на чувствителността на методите позволява да се прогнозира вероятността от възникване на свлачищен процес.

Извършен е комплексен анализ на влиянието на анизотропните свойства на скалите върху устойчивостта на откосите.

Показано е, че при моделиране на устойчивостта на откосите, изградени от анизотропни скали, е целесъобразно да разгледат два вида анизотропия:

- Първият тип анизотропия е свързан с природната анизотропност на свойствата на литоложките разновидности, изграждащи откоса (литогенетична или структурна анизотропия). Моделирането на устойчивостта на откоса със структурна или литогенетична анизотропия позволява да се оцени мигновената устойчивост на откоса.

- Вторият тип анизотропия е обусловена от образуването на анизотропни свойства при формирането на плъзгателна повърхнина във вид на геотехнически хоризонт въз основа на деформациите.

Намаляването на коефициента на устойчивост за сметка на даден ефект може да се охарактеризира като дълговременна устойчивост.

Анализът на оценката на устойчивостта на откосите с отчитане на влиянието на анизотропните свойства на скалите показва, че те се отразяват както върху изчислителната повърхнина на плъзгане, така и върху стойността на коефициента на устойчивост.

Въз основа на изследванията, следва да се отбележи, че комплексното използване на съвременните методики за математическо моделиране, позволява да се повиши достоверността на оценката на устойчивостта на откосите.

5. Обосновано е приложението на МКЕ за оценка на устойчивостта на работен борд в открит рудник (на примера на рудник „Трояново-север“, Мини „Марица-изток“ АД)

Представени са модели, разработени чрез компютърна програма, ползваща МКЕ и е установена приложимостта им за условията на рудник «Трояново-север», мини «Марица-изток» АД.

Установеното напрегнато състояние в масива дава възможност да се посочат зоните с най-неблагоприятното разположение на главните напрежения (σ_1 и σ_3), по които могат да се очертаят рисковите места.

Профилите с изолинии на максималните срязващи напрежения са меродавни при тълкуване на поведението на скалния масив, привързан към минните работи или към макроструктурни дефекти в масива (разседи, макропукнатини и т. н.).

По разпределението на напреженията σ_1 и σ_3 може да се оптимизира положението и формата на вероятната плъзгателна повърхнина в работния борд на открития рудник и местата, в които могат да възникнат най-големи свлачищни деформации.

Работата със съвременни специализирани геотехнически програмни продукти, базирани на метода на крайните елементи, дава възможност за един по-различен подход при оценка устойчивостта на даден откос.

Резултатите от решенията с помощта на МКЕ (SSA) и (RSM) за коефициента на устойчивост на работния борд на рудник „Трояново-север“ не се различават съществено (до 5% разлика) от резултатите, получени чрез прилагане на класическите методи. Предимството на МКЕ се изразява в по-пълното отчитане на напрегнатото и деформирано състояние на масива, което при по-голяма част от конвенционалните методи е недостатък.

6. Предложени са принципни решения за избор на методи за оценка на устойчивостта на работен борд и възможност за технологично въздействие

Изборът на подходящ метод за оценка на устойчивостта на работния борд на открит рудник се основава на вземането на решения често пъти в условията на неопределеност на природната среда. Преодоляването на този проблем може да стане чрез използването на съвременни високо ефективни математически методи за изследване. Това се доказва от приложената теория на статистическите решения при избор на технологичен вариант за въздействие в условията на неопределеност върху устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново–север“, мини „Марица-изток“ АД. Като основен критерий е използван риска при избора на технологично въздействие върху устойчивостта на работния борд.

Предложените принципни мероприятия за технологично въздействие върху устойчивостта на работните бордове в открити рудници намират конкретно приложение за бързо въздействие върху устойчивостта на работен борд, т.е. необходимост от преснемане на нивото на откривните хоризонти за условията на рудник „Трояново-север“, Мини „Марица-изток“ АД.

ОСНОВНИ НАУЧНИ ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

При реализирането на поставената цел и свързаните с нея задачи, в дисертационния труд са постигнати следните по-съществени теоретични и теоритично-приложни приноси:

1. Формулирани са теоретичните основи за оценка на устойчивостта на откоси на стъпалата и бордовете в открити рудници.

2. Разработена е актуална, съответстваща на съвременните изисквания класификация на методите за оценка на устойчивостта на откосите въз основа на механо-математичен подход.

3. За оценка на устойчивостта на откосите е обосновано 3D моделирането въз основа на методите на граничното равновесие.

4. Разгледани са перспективните методи за оценка на устойчивостта на откосите. Установено е, че:

- Разликата в резултатите при изчисляване на коефициента на устойчивост в отделните групи методи за гранично равновесие при изчислителна схема с призма на активен земен натиск, централен блок и призма на пасивен земен натиск и оптимизирана плъзгателна повърхнина (дъга от окръжност и параболи от втора и трета степен) е значителна в сравнение с резултатите, получени чрез МКЕ за оценка на устойчивостта на работния борд на рудник „Трояново-север“, Мини „Марица-изток“ АД.

- Използваният в изчислителните методи вероятностен анализ за оценка на устойчивостта позволява да се извърши оценка на свлачищна опасност (терминологично да се определи вероятността от възникване на свлачищен процес).

- Приложеният анализ на чувствителността на метода позволява да се определи зависимостта между коефициента на устойчивост на откоса и закономерното изменение на един или няколко параметъра.

- При моделиране на устойчивостта на работния борд, изграден от анизотропни литоложки разновидности е целесъобразно да се отразят два вида анизотропия. Първият вид е свързан с природната (литогенетичната) анизотропия на свойствата на литоложките разновидности, а вторият вид е обусловен от образуването на анизотропни свойства при формиране на свлачищни зони във вид на максимални свлачищни деформации.

5. Обосновано е приложението на МКЕ за оценка на устойчивостта на работен борд в открит рудник (на примера на рудник „Трояново-север“, Мини „Марица-изток“ АД).

6. Предложени са принципни решения за избор на методи за оценка на устойчивостта на работен борд и възможност за технологично въздействие за предотвратяване на свлачищни явления.

НАУЧНИ ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД:

1. **Stoeva, P.** et al. POSSIBILITIES FOR THE OCCURRENCE OF LANDSLIDE PHENOMENA IN CLAY SEDIMENTS. / P. Stoeva, V. Ivanova, Xiaoling Li // 30th International Geological Congress (Beijing, China), 30, 4-14.08.1996.

2. **Стоева, П., Ксиаолинг Ли.** Реологични свойства на глинни с различни структурни връзки. VIII Национална школа - семинар по реология, Българско реологично дружество, Централна лаборатория по физико-химическа механика – БАН, 8-11.10.1996, с. 55-56.

3. **Ксяолин Ли.** Моделиране на напрегнатото състояние на масива в открит рудник Фу Шун Китайска народна република. V Национална конференция с международно участие по открит добив на полезни изкопаеми: "Състояние и развитие на открития добив на полезни изкопаеми при пазарни условия" (Варна), Сб. доклади, 2-6.06.1998, № 1, с. 219-225.

4. **Ксяолин Ли.** Ретардацията – индекс за структурните промени при дълговременно деформиране. Год. МГУ /"Технология и направление на минно-добивните работи", vol. 42, part II, Mining Engineering, Sofia, 1998-99, с. 25-28.

5. **Ксиаолинг Ли-Щерева.** Приложение на метода на крайните елементи за изследване устойчивостта на бордове на открити рудници ФУ ШУН (Китай) и мини „Марица-Изток“ (България), Год. МГУ /"Добив и преработка на минерални суровини", т. 59, св. II, София, 2016, с. 43-48.

6. **Trifonova M., Xiaoling Li-Shtereva,** Analytical Mathematical Models for Determining the Probable Sliding Surface of the Working Slope, *Mining and Geological Today, International Symposium*, 18-20.09.2017, Belgrade, ISBN 978-86-82-637-13-2, pp. 179-182.

ЛИТЕРАТУРА

(само цитираната в автореферата според номерацията в дисертацията)

1. Велев, М. С. Проектиране на подземни рудници. С. Техника, 1988, 333 с.

2. Георгиев Г. и др. Методическо ръководство за стабилитетни изчисления на работни, подсипвани и неподсипвани наработни бордове и откоси на насипищата на рудниците от Източномаришкия басейн. С., 1981.

3. Георгиев, Г. К. Устойчивост на откосите на минни изкопи и насипи. Трудове на НИТИ "Минпроект", т. XXV, С., 1988, 9-17 с.

4. Георгиев, Г. Развитие на свлачищните процеси в откритите въглищни рудници, "Въглища", кн. 6, 1972.

5. Гинзбург, Л.К. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползнего давления. Москва: Центральное бюро научно-технической информации, 1986. 134 с.

6. Гичев, Т. Р., Здр. К. Карамитева. Теория на игрите. С., Наука и изкуство, 1980, 187 с.

7. Дёмин, А. М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов. Недра, М., 1973.
8. Заславский, Б. В. Инженерная геология, механика грунтов, основания и фундаменти. М., Висшая школа, 1987.
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике, Москва, Мир, 1975.
10. Иванов, И. Върху методиката на определяне якостта на глините при срязване с оглед устойчивостта им в откритите минни изработки. Тр. върху геолог. на България, серия Инженерна геология и хидрогеология, БАН, кн. 3, 1964.
11. Иванов, И., П. Гечев. Върху устойчивостта на откосите в откритите рудници на Източномаришкия лигнитен басейн. Тр. върху геолог. на България, серия Инженерна геология и хидрогеология, БАН, кн. 4, 1965.
12. Иванов, И. П. Инженерно-геологические условия месторождения полезных ископаемых. Ленинград, 1982.
13. Каган, А. А. Расчетные характеристики грунтов. М., Стройиздат, 1985, 248с.
14. Кисляков, С. Стохастически методи в приложната механика. С., Техника, 1981, 165с.
15. Падуков, В. А. Прогнозиране устойчивости бортов карьеров Наука, Л. 1981.
16. Пенчев, П. и др. Хидрогеология и основи на инженерната геология. Техника, С., 1990.
17. Резниченко, С. С. Математическое моделирование в горной промышленности. М., Недра, 1981, 215 с.
18. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. М., 1972.
19. Стоева П. Реологично свойство на някои видове плиоценски глин. Дисертация, С., ГИ БАН, 1968.
20. Тодорова, М. Деформационните и якостни свойства на плиоценските глин и въглища, като фактор на устойчивостта на откосите в откритите рудници на Източномаришкия басейн. Дисертация, С., ВМГИ, 1970.
21. Туринцев, Ю. И. и др. Организация наблюдениями за деформациями массивом горных пород на карьерах. В. сб. Умеждународный симпозиум по маркшайдерскому делу, т. 4, Болгария, 1982, 107-116 с.
22. Фоменко, И. К. Математическое моделирование напряженного состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами // дис... канд. геол. минер. наук: 04.00.07. Москва. 2001. С. 138.
23. Хуан Я. Х. Устойчивость землянных откосов. Москва: Стройиздат, 1988. С. 240.
24. Цонков, С. М., Г. Н. Сапунджиев. Въведение в кибернетиката. Техника, София, 1984.
25. Fomenko I.K. Zerkal O.V. Proceeding of the technical meeting TC207 - Workshop on soilstructure Interaction and Retainig Walls // Tree-dimensional slope stability analysis. Dubrovnic. 2011. pp. 125-129.
26. Fredlund D.G., Krahn J., Pufahl, D.E. The relationship between limit equilibrium slope stability methods // In Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm. 1981. pp. 409-416.
27. Gitirana, G. "Weather-Related Geo-Hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability ". University of Saskatchewan, 2005 pp.316

28. Hovland H.J., "Three-dimensional slope stability analysis method," Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, Vol. 103, No. 9, 1977. pp. 971-986.
29. Hungr O., "An extension of Bishop's Simplified Method of slope stability analysis to three dimensions," Geotechnique. London, Vol. 37, No. 1, 1987. pp. 113-117.
30. Kou Xiao-dong, et al. Stability analysis on the high slopes of Three Gorges ship lock using FLAC-3D. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 19(5): 630-633.
31. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1. Calgary, Alberta: GEO-SLOPE International Ltd., 2004. 396 pp.
32. Kulhawy. F.H. Finite element analysis of the behavior of embankments // Ph.D Thesis, the University of California, at Berkley. California. U.S.A. 1969.
33. Lowe, J., and Karafiath, L. Stability of Earth Dams upon Drawdown // Proceedings of the First PanAmerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexican Society of Soil Mechanics. Mexico D.F. 1960. pp. 537-552.
34. Morgenstern N. R. and Price V.E., "The analysis of the stability. of general - slip surface," Geotechnique, Vol. 15, 1965. pp. 70-93.
35. Sarma S. K. Stability analysis of embankments and slope. Journal of Geotechnical Engineering, 1979, 105: 1511-1524.
36. Sarma S.K., "Stability Analysis of Embankments and Slopes," Géotechnique, Vol. 23(3), 1973. pp. 423-433.
37. Sun Yu-ke, et al. Engineering geological studies of the stability of slope in rock. Chinese Journal of Geology, 1965,(4): 330-352.
38. Sun Yu-ke, et al. Principal geological models of deformation and failure of rock slopes in China. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1983, 2(1): 67-76.
39. Sun Yu-ke, Yang Zhi-fa, DingEn-bao, et al. Study on slope stability of open pit in China, M., Beijing: China Science and Technology Press, 1999.
40. Trifonova M., System SlopeStabBG for Calculation of Stability Factor in Opencast Mines. X International Conference on Information Systems & Grid Technologies (ISGT'2016), Sofia, 2016.
41. Zheng Ying-ren, et al. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381-3388.
42. Zheng Ying-ren, et al. Progress in analysis of slope stability. J., Underground Space, 2001, 21(4): 262-338.
43. Zheng Zhi-neng, et al. Visual simulation of rock-fall of slope based on particle flow theory. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 46-49.
44. Zhu Da-yong, et al. Rigorous and quasi-rigorous limit equilibrium solutions of 3D slope stability and application to engineering. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1513-1528.
45. Zhu Yu-xue и др. Применение стохастического моделирования для анализа устойчивости откоса на рудном карьере. Пекин: Металлургическая индустрия издательство, 1993.
46. Zhu Yu-xue. Reliability Analysis of Slope. M., Beijing: Metallurgical industry Press, 1993.
47. Zou J. Z., et al. Search for critical slip surface based on finite element method. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(1): 233-24.

SUMMARY

Dissertation of theme: "Selecting a method for assessing the stability of the opencast mining work boards and identifying the opportunities for technological impact"

Author: Mag.Eng. Xiaoling Li-Shtereva

Scientific consultants: Prof. Dr. Ivaylo Koprev and Assoc. Prof. Dr.Mariana Trifonova

Keywords: Opencast mining, slope stability, finite element method

The timeliness of the thesis work is determined by the intensive development of the opencast mining and the need to create safe working conditions for the mining mechanization and service personnel.

For more than three centuries the slope stability, incl. the work board stability in the opencast mines remains the most difficult task in geotechnics. Currently, over 200 approaches are applied to assess the slope stability. The method selection is initially determined by the mathematical problem-solving technique, the type of landslide process and the mechanism of possible landslide mass displacement.

The purpose of the thesis work is to develop a comprehensive approach for selecting a method for assessing the stability of the opencast mining work boards and identifying the opportunities for technological impact. To achieve this purpose, the following tasks were solved:

1. Research and analysis of theoretical, analytical and grapho-analytical methods for assessing the slope stability.
2. Development of a modern, up-to-date classification of methods for assessing the slope stability.
3. Development of basic solutions when selecting a method for assessing the slope stability.
4. Analysis of current perspective directions for slope stability assessment in order to increase the reliability of the results of the applied calculation methods for slopes stability assessment.
5. Development of a methodology for decision making for the opencast mining work board control in the context of environmental uncertainty. Creation of a probability model and methodology for work board stability assessment.
6. Approval of the methodology for a comprehensive approach for selecting a method for slope stability assessment.

The results of the thesis work were implemented for assessment of the work board stability at Troyanovo-North Mines at "Mini Maritza East" AD.

The developed scientific and methodological principles for assessing the slope stability in open-cast mines and quarries can be used for educational, research and design purposes.