

Георги Илиев Трапов

**ПРИЛОЖЕНИЕ НА СТАТИСТИЧЕСКОТО МОДЕЛИРАНЕ
ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧИ ПРИ ДОБИВА
НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация

за присъждане на образователна и научна степен “Доктор”

Научна специалност: 02.08.04 „Открит и подводен добив на полезни изкопаеми” (Методи и модели за управление на технологичните процеси)

Професионално направление: 5.8. „Проучване, добив и обработка на полезни изкопаеми”

Рецензенти:

Проф. д-р Кольо Лефтеров Колев

Проф. д-р Методи Георгиев Маждраков

София, 2012г.

Дисертацията съдържа 258 страници, 43 фигури, 25 таблици и 111 литературни източници.

Дисертационния труд е обсъден от разширен състав на катедрения съвет на катедра "Открито разработване на полезни изкопаеми и взривни работи" на 29.05.2012г. и е насочен за защита към Научно жури.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на2012 г. от.....часа в зала.....на МИННО – ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ "Св. Иван Рилски" за присъждане на образователна и научна степен "Доктор" пред Научно жури.

Материалите по защитата са на разположение на интересувалите се в канцеларията на сектор "Следдипломна квалификация" на МГУ "Св. Иван Рилски"

Адрес: 1700 София, Студентски град
МГУ "Св. Иван Рилски"

Тираж: 25 бр.

Печат: Издателска къща „Св. Иван Рилски” – София

ВЪВЕДЕНИЕ

Рудниците представляват сложни висококомеханизирани технически системи. През цялото време на съществуване им има възможност да престанат да изпълняват функциите си един или повече конструктивни елемента на рудника – стъпала, бордове, пътища и др. Това често е съпроводено с кратковременни колебания в параметрите на системата, а понякога и до невъзможност да се продължи експлоатацията, което води до тежки технико-икономически последици.

Решаването на тези проблеми е свързано с две групи фактори - с природната даденост и с възприетите минно-тихнически и технологични решения.

Природните и много технически и технологични параметри имат вероятностен характер, което ни задължава да търсим начини да отчетем този факт. Пътищата за това са основно два. Единият е по натрупаните наблюдения за определен фактор да потърсим най-близкия известен вероятностен закон, т. е. този, който най-добре приближава наблюдаваните стойности. Другият път е по намерения вариационен ред да се извърши многократно имитиране на стойност на фактора, с която да участва в изчислителния процес. Вторият път е всъщност статистическото моделиране.

Възниква въпросът как да използваме натрупаната информация за решаване на определен проблем? Това може да стане с построяването на физически или математически модели, които описват поведението на изследвания обект. Някои от тях са детерминирани, други имат вероятностен характер. Независимо от характера му, в модела не е възможно да се отчете влиянието на всички фактори, но правилно съставеният модел трябва да описва основни страни на изследвания физически процес.

За да могат успешно да се решават възникващите в минната практика задачи трябва да се използва разнообразна по характер информация, подходящи методи и модели. Необходимо е създаването или използването на готово програмно осигуряване. Това позволява да се построят адекватни модели на реални процеси, като при изследването им се получават резултати по-близки до реалните, което води до вземане на обосновани управленски решения.

СТРУКТУРА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

В Глава 1 е направен литературен обзор по темата на дисертацията. Посочени са основни изследвания, показващи вероятностният характер на свойствата на природната среда и редица технически, технологични, технико-икономически и др. параметри. Разгледани са и прилаганите до сега начини за отчитане на този характер. Един от методите за статистическо моделиране с широко приложение е методът Монте Карло.

В Глава 2 са представени статистически модели, посредством които са получени решенията на множество задачи от областта на открития добив на полезни изкопаеми. Получени са конкретни числени резултати, които са използвани за оценка и анализ на поведението на изследваните обекти.

В Глава 3 са изложени статистически модели, посредством които са решени задачи от областта на подземния добив на полезни изкопаеми.

Вероятностният подход е приложен за получаване оценки на класификационни характеристики на скалите, коефициант на устойчивост с прилагане на различни критерии, полето на напреженията и деформациите с прилагане на метода на крайните елементи.

Глава 4 съдържа основните собствени програми, посредством които са реализирани алгоритмите при моделирането на проблемите, разгледани в глави 2 и 3.

АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТИКАТА

Нуждите на човека от полезни изкопаеми се увеличили значително, която тенденция се запазва. Налага се да се изграждат сложни високомеханизирани рудници. Това доведе до нови виждания за решаване на екологични, технологични, технически, технико-икономически проблеми. Минната наука и практика трябва постоянно да са нивото на тези предизвикателства, като стремежът е да се търсят познанията и от други области, като математика, физика и др. Прилагането на математически методи позволи да се решат редица задачи от минното производство, а вече е необходимост да се използват методите на информатиката и компютърното програмиране.

По всяко време конструктивен елемент на рудника (стъпало, борд, галерия, път и др.) може да излезе от нормалното си състояние и да престане да изпълнява предназначението си. Във всеки момент има възможност да престанат да изпълняват функциите си един или повече конструктивни елемента на рудника – стъпала, бордове, галерии, пътища и др. Поддържането на жизненоважните съоръжения (като бордове, галерии и др.) и техника в устойчиво състояние, с цел те да изпълняват предназначението им, е от изключително значение и не бива да се подценява в нито един момент от живота на рудника, а дори и след закриването му. Особено важни са съоръженията, където са разположени работници, изкопна техника, транспортни комуникации, отводнителни системи, хранене с енергия и др.

Решаването на проблемите с устойчивостта на съоръженията в рудника е свързано основно с две групи фактори - природните и минно-технически и технологични, които имат вероятностен характер и влизат в сложни връзки. Тогава пътищата за решаване на задачите са два. Единият е по натрупаните стойности за определен фактор да потърсим най-близкия известен вероятностен закон. Другият е по намерения вариационен ред да се извърши имитиране на стойност на фактора, с която да влиза в изчислителния процес. Именно този подход за решаване на задачи от добива, който представлява статистическото моделиране (Метод Монте Карло), е възприет в този дисертационен труд. Вероятностните модели позволяват да се използва по-пълно информацията, получената при наблюдения на определен фактор.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Целта на представения дисертационен труд е:

Да се систематизират съществуващи и създадат нови приложения на статистическото моделиране, използването на които да спомогне за решаване на някои задачи от добива на полезни изкопаеми.

За постигане на формулираната цел се търси решение на следните основни задачи:

А. От областта на открития добив:

1. Определяне на вероятността за устойчивост при изграждане на насипища;
2. Построяване и изследване на модел за изчисляване на устойчивостта при многослойни насипи и масиви;
3. Намиране на вероятността за устойчивост на откоси и технологични възможности за въздействие;
4. Получаване на вероятността за устойчивост на откоси в строителни изкопи;
5. Определяне на риска при работа на роторни багери в условията на свлачищни деформации и свлачища в открити рудници;
6. Намиране и изследване на значението на риска при анализ на устойчивостта на откоси в многослойна среда;
7. Определяне посоката на работния фронт при добив на скални облицовъчни материали с отчитане вероятностния характер на напукаността;
8. Намиране екстремалните стойности на коефициента на устойчивост по метода на случайното търсене;
9. Прогнозиране на производителността на сонда посредством имитационно моделиране.

Б. От областта на подземния добив:

1. Определяне на класификационните характеристики на скалния масив посредством статистическо моделиране;
2. Построяване на вероятностен подход при определяне на Q , RMR , N' , като основа за оценка на риска;
3. Постановка и решаване на задачата за определяне на N' с прилагане на статистическото моделиране;
4. Построяване и изследване на вероятностен модел при оценка на коефициента на устойчивост с прилагане критериите на Mohr Coulomb, Hoek-Brown и Drucker-Prager;
5. Прилагане на метода на крайните елементи, за намиране полето на напреженията и деформациите, в условията на изменчивост на свойствата на скалите.

ГЛАВА 1. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА. ЦЕЛ, ЗАДАЧИ И МЕТОДИ ЗА ТЯХНОТО РЕШАВАНЕ

В Глава 1 са посочени основни изследвания, показващи вероятностният характер на свойствата на природната среда и на редица технически, технологични, технико-икономически параметри.

При изследване поведението на такава сложни системи, каквато са откритите и подземни рудници, основната информация се получава по пътя на наблюдението и експеримента. Анализът и оценката са пряко свързани с отчитане на съвкупното действие на множество фактори. За да се опише поведението на системата се съставят съответни модели – физични, математически, словесни, графически и др. При извършване на моделирането всеки от факторите участва с определена стойност. Възниква въпросът доколко добре тази стойност представя влиянието на параметъра върху изследвания процес. Основания за това са, че скалния масив има сложна природа и свойствата му зависят от: минералния и зърнометричен състав; структурата; текстурата; характера на взаимодействие между отделните компоненти на състава; наличие на дефекти и елементи на отслабване; историческото формиране на скалите; начина и условията за провеждане на експеримента; от въздействието на човека и др.

Развитието на геологията и минното дело през последните десетилетия е свързано с усилията на научните работници и специалистите при анализа и оценката на протичащи процеси и явления да се обръщат не само към традиционните инженерни методи, а и към такива, които ползват понятията „вероятно“, „случайно“. Това всъщност са методите от теорията на вероятностите и математическата статистика, които съчетани с инженерните методи доведоха до създаване на нови области от научното познание, каквато е теорията на надеждността.

Е.И. Ильницкая и др. [3] отбелязват, че експериментално получените стойности на физико-механични показатели, даже за еднородни скали, намиращи се при еднакви условия, варират в известни граници.

Г.А. Михайлов [5] прави задълбочено изследване на влиянието на някои някои природни фактори, като напуканост, деформационни показатели на скалния масив и др., върху деформационните процеси за условията на подземен добив.

Много по-определено В.Д. Ломтадзе [4] казва: „...скалите имат голяма нееднородност на свойствата и характеристиките си, представлявайки стохастическа среда. За това възниква необходимостта основните физични и якостни свойства на скалите да се разглеждат като случайни величини с естествен природен произход, които се характеризират със свои закони на разпределение за всеки конкретен район, участък, пласт и т. н....”.

Р. Ф. Чини [12] използва различни статистически методи за обработка на първичната геоложка информация и вземане на решение относно целесъобразността от приемане на един или друг модел.

Редица автори отбелязват съществуването на нелинейна зависимост между якостните показатели ъгъл на вътрешно триене и кохезия по възможни повърхнини на плъзгане.

Много автори изследват законите на разпределение на физико-механичните свойства на скалите. Някои като З.Д. Низгуредкий [6], W. Forster, E. Weber [18]

предлагат кохезията, ъгълът на вътрешно триене и други показатели да се разглеждат като случайни величини описани с набор от различни разпределения: нормално, равномерно, гама, емпирично.

Е.Е. Alonso [13] анализира степента на изменчивост на физичните и якостните показатели за условията на канадските пластични глини. Предлага кохезията и ъгълът на вътрешно триене да участват в общата схема за определяне поведението на откоса, посредством средните си стойности и дисперсии.

Като отчита, че природните, минно-техническите и икономическите фактори, имат вероятностен характер Б.Д. Половов [7] също изтъква необходимостта от преминаване към вероятностни методи на изчисление вместо използваните детерминирани.

Э.Г. Газиев, В.И. Речицкий [1] посочват причините, които водят до необходимост от използване на някои приложения от теорията на вероятностите. Предполагат, че якостните показатели по повърхнините на отслабване и останалите величини, влизащи в изчислителната схема са случайни величини.

Стойностите на якостните и деформационни показатели са базови, както при избор на добивна технология, така и при оразмеряване на елементи на минните технологии.

Един от първите показатели, характеризиращи качеството на скалния масив, в който се извършват минните работи е *Rock Quality Designation (RQD)*. Показателят *RQD* се определя в зависимост от отношението на извадената ядка с регламентирано качество към общата дължина на сондажа. Логично е съждението, че качеството на сондажната ядка зависи от съществуващата структурна нарушеност на масива. А тя от своя страна определя поведението на откритите добивни пространства с определени размери, респективно с определена форма и големина на напречното им сечение. Параметърът *RQD* е заложен в основата на множество класификации, оценяващи качеството на скалния масив.

Вероятностният характер на свойствата на природната среда и на редица технологични, технически и технико-икономически параметри изисква и съответни модели и методи за моделиране. Един от методите за статистическо моделиране с широко приложение е методът Монте Карло И.М. Соболев [8], N. Metropolis, S. Ulam [21]. Голямата сила и широка приложимост на метода Монте Карло се изяснява, когато се изследват вероятностни по своя характер процеси, зависещи от фактори с вероятностен характер, каквито са природните условия, технологичните фактори и др. Методът на статистическото моделиране може с успех да се използва при решаване на множество задачи от открития и подземен добив. С негова помощ се получават решения на актуални приложни задачи, които е трудно или невъзможно да бъдат решени с помощта на съществуващите аналитични методи. Практическата реализация на метода изисква задължително използването на компютърна техника, тъй като се налага обработване на огромна по обем информация.

При решаване на задачи, с използване на метода Монте Карло, се налага да се моделират различни случайни величини, т.е. техните вероятностни закони. Напоследък за тази цел се използва следният широко приложим подход. Стойностите на всяка случайна величина се получават по пътя на преобразуване на стойностите на определена случайна величина. Обикно-

вено ролята на такава величина играе равномерно разпределена случайната величина γ , с възможни стойности в интервала $[0; 1)$.

Задачата се свежда до решаване относно x на уравнението

$$F_{\xi}(x) = \eta,$$

където η е една стойност на γ , а $F_{\xi}(x)$ е функцията на разпределение на разглежданата случайна величина ξ .

Статистическото моделиране предполага проста структура на алгоритъма за численото му реализиране. Методът Монте Карло позволява да се моделира всеки процес, на протичането на който влияят случайни фактори. Той може да се прилага дори тогава, когато при решаването на определен проблем не са налице случайни фактори. В този смисъл той може да се разглежда като широко приложим метод.

ГЛАВА 2. РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧИ В ОТКРИТИЯ ДОБИВ ПОСРЕДСТВОМ СТАТИСТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ

2.1. Определяне на вероятността за устойчивост при изграждане на насипища

По време на строителството на минни и строителни обекти в плиоценският басейн на Марица изток (България) се изграждат големи непродуктивни депа от глини. Глините от откривката в откритите рудници имат различни физични свойства и ниско съпротивление. Наблюдават се големи деформации, както в откосите на насипищата, така също и в основата им.

Специфичните особености на съществуване на насипищата водят до технологичен и икономически риск, Е. Alonso [13].

Дълговременните наблюдения, М. Todorova, Р. Stoeva [23], за механизма на деформиране на насипищата дават възможност да се установи схема за деформиране чрез сложна потенциална хлъзгателна повърхнина (фиг. 2.1).

При схема 1 насипището се изгражда от два пласта от плиоценски глини: долен – сиви глини с дебелина H_2 ; горен – органични глини с дебелина H_3 , които изменят свойства си във времето – от момента на насипване до достигане на относителна консолидация.

За да се определи риска по отношение на устойчивостта на откосите, е съставен математичен модел в съответствие с възприетата схема на деформиране и собствена компютърна програма VARIAR2.

При моделирането се имитират стойности за: ъгълът на откоса (α); височината H_2 , $H_3=H-H_2$; за всеки пласт съответно - γ_1, φ_1, c_1 ; γ_2, φ_2, c_2 ; γ_3, φ_3, c_3 .

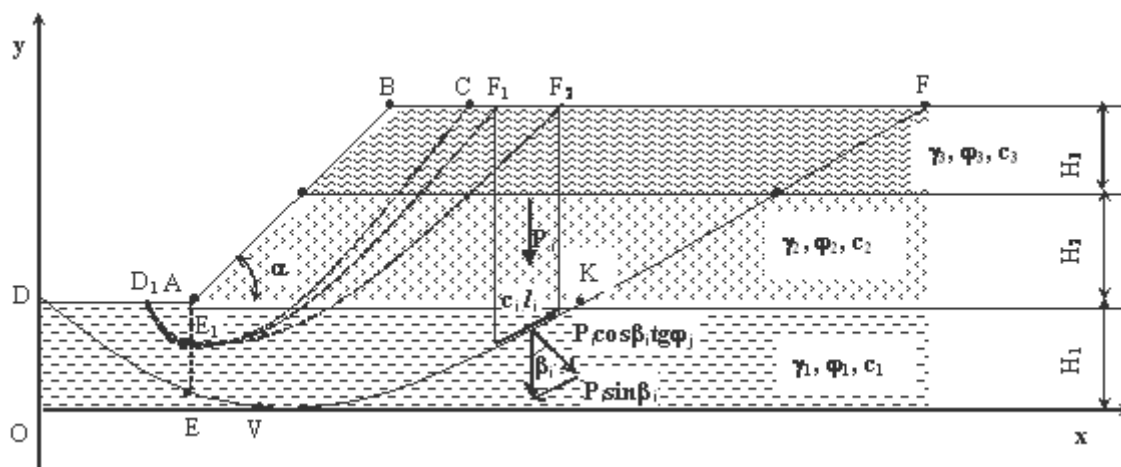
Коефициентът на устойчивост (F) се определя по класическата дефиниция като отношение между задържащите (пасивните) и свличащите (активните) сили.

Изчисленият минимален коефициент на устойчивост $F_{\min}$, средната му стойност $\bar{F}$ и стандарта на средната стойност са дадени в таблица 2.1.

Рискът за възникване на деформации и свлачища за всяко изследвано състояние се дефинира с помощта на класическата формула за вероятност

$$R = 1 - \frac{m}{n},$$

където m е броят на опитите, при които пасивните сили са по-големи или равни на активните, т.е. $F \geq 1$; n – общият брой на проведените компютърни експерименти.



Фиг. 2.1 Параметрите на откоса (ъгълът α и височините H_1 и H_2) и конфигурацията на потенциалната хлъзгателна повърхнина

Таблица 2.1

Състояние	F_{min}		$\bar{F}$	
	Схема 1	Схема 2	Схема 1	Стандарт
Неконсолидирано	0,96	0,94	0,94	0,035
Частично консолидирано	0,93	0,91	0,91	0,032
Консолидирано	0,91	0,88	0,88	0,030

При схема 1 рискът за съответните състояния от таблица 2.1 е: $R = 25\%$; $R = 54\%$; $R = 81\%$.

Предложеният метод може да се използва с голям успех за различни случаи за оценка на риска на многослоен масив. Получените резултати съответствуват на наблюденията "in situ".

2.2. Построяване и изследване на модел за изчисляване на устойчивостта при многослойни насипи и масиви

Надвъглищният плиоценски комплекс на бордовете в откритите рудници на Марица изток (България) представлява многослойна среда с различни физични и якостни свойства за всеки пласт. При изграждането на насипищата, успоредно с изземването на откривката се създава също многослойна макроструктура.

Устойчивостта на бордовете в многослойния масив зависи от дебелината на литоложките разновидности, от физико-механичните им характеристики и от технологичните параметри на стъпалата и борда като цяло.

Въз основа на извършените многобройни лабораторни изследвания на физичните и якостни свойства на всички литоложки разновидности от плиоценския профил в масива са получени съответните интервални статистически разпределения за разновидностите:

- в борда: сиви глини; черни глини; въглища; междупластие; подвъглищни глини;
- в насипището : сиви глини; черни глини; контакт.

С помощта на статистическо моделиране, за всяка литоложка разновидност се избират по случаен начин определени стойности на обемната плътност (γ), ъгъла на вътрешно триене (φ) и кохезията (c).

Технологичните параметри на стъпалата са представени на базата на реален профил от открит рудник. Тъй като в определени интервали от време тези параметри се изменят в малък диапазон, то те се разглеждат като детерминирани величини.

Практически са възможни две схеми за изграждане на насипището. При всяка от тях има три хоризонта. Структурата на хоризонтите, разгледана от по-високите коти към по-ниските, при всяка една от схемите е дадена в таблица 2.2.

Съставена е компютърна програма за изчисляване на устойчивостта на бордовете в Марица изток, която отговаря на съществуващите механизъм и изчислителна схема на деформиране, а именно призма на активен земен натиск, централен блок, призма на пасивен натиск, слаби контакти или огледални повърхнини, Г. Георгиев, Ш. Христов [2].

Таблица 2.2. Структура на хоризонт от насипището

Схема А	Дебелина [m]	Схема Б	Дебелина [m]
Сиви глини	18-22	Черни глини	3,5-4,5
Черни глини	3,5-4,5	Сиви глини	18-22

В настоящата разработка статистическото моделиране се реализира в следната последователност:

- имитират се стойности на височината на стъпалото, ъгъла на откоса, ширината на площадката за всяко стъпало, за всяка разновидност се получават – дебелината, γ_i, φ_i, c_i ;

- получава се коефициента на устойчивост (F).

Резултатите от прилагането на описания начин за изчисляване на устойчивостта, съответно за работния борд и насипището, са дадени в таблици 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3. Средни стойности и доверителни интервали за коефициента на устойчивост на борда.

Брои на изпитанията	Средна стойност на F	95% доверителен интервал за F	
		ляв край	десен край
200	1,09	0,97	1,24
500	1,12	1,01	1,23
1000	1,11	1,01	1,22

Анализът на резултатите в таблица 2.3 показва, че при разгледания профил със сигурност 95% коефициента на устойчивост на борда се намира в границите [1,01;1,22].

Резултатите в таблица 2.4 показват, че само схема Б осигурява доверителен интервал за коефициента на устойчивост с граници над 1. Следователно, ако няма технологични пречки, трябва да се възприеме тази схема при насипообразуването.

Таблица 2.4. Средни стойности и доверителни интервали за коефициента на устойчивост на насипището.

Схема	Брои на изпитанията	Средна стойност на F	95% доверителен интервал за F	
			ляв край	десен край
A	200	0,92	0,77	1,07
A	500	0,91	0,77	1,06
A	1000	0,91	0,78	1,04
Б	200	1,14	1,00	1,28
Б	500	1,13	1,02	1,25
Б	1000	1,13	1,03	1,23

2.3. Намиране на вероятността за устойчивост на откоси и технологични възможности за въздействие

Оценката на устойчивостта при проектиране и оформяне на откосите в реалния масив се затруднява от неопределеността на използваната изходна информация.

Неопределеността основно зависи от следните обстоятелства:

- Якостните и деформационни показатели на скалите се получават от отделни пробни тела или на ограничени площадки, след което се използват за целия масив. Степента на достоверност на този пренос зависи от постоянството на характеристиките по целия масив (от неговата еднородност), броя, метода и точността на експериментите;

- Геометричните параметри на равнините на отслабване (пукнатини и контакти) в масива (азимут и ъгъл на западане, дължина, гъстота, и т.н.) имат вероятностен характер;

- Силовите въздействия върху откосите (сеизмични от ПВР, динамични натоварвания от действащата механизация – багери, жп транспорт и др.) в периода на експлоатация също имат случаен характер.

При оценката на надеждността на откосите на стъпалата и бордовете в откритите рудници като критериално условие се използва устойчивостта, което може да се запише във вида $A \geq B$, където A и B са функциите на всички участващи в описанието на разглеждания процес, фактори и условия. В общия случай A е сумата на задържащите сили, а B е сумата на свличащите сили. Вероятността за устойчиво състояние на откоса е $U = P(A \geq B)$, а рискът (R) се определя от равенството $R = 1 - U$. За пълното отчитане на наличната информация за изчисляване на A и B най-подходящ е методът на статистическото моделиране, Т.Н. Naylor [22]. При него за всеки вариант на съчетаване на стойностите на изходните параметри (природни и технологични), за коефициента на устойчивост $\left(F = \frac{A}{B}\right)$ се получава определена стойност.

Съвкупността от тези стойности статистически характеризира коефициента на устойчивост (F) в зависимост от параметрите на различните литоложки разновидности и геометрията на стъпалото.

Нееднородността на масива налага мощностите на седиментите да се представят с емпиричните им статистически разпределения, получени въз основа на обработката на голям брой геодезични измервания.

За облекчаване на изчислителните процедури, данните на физичните и

якостните свойства тук са приети за константни величини.

Надеждността на откоса се дава с класическата зависимост

$$U = P(A \geq B) = \frac{M}{N},$$

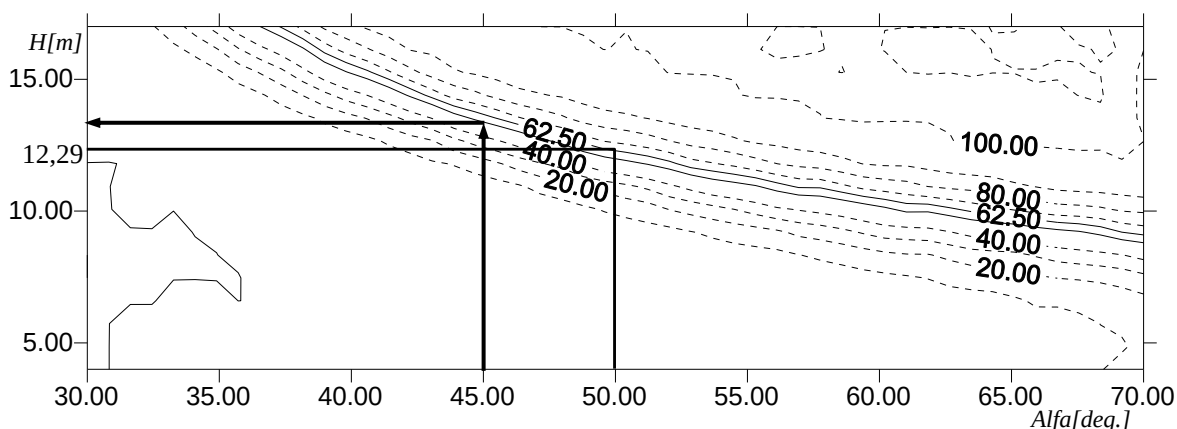
където: M е броят на случаите, за които е изпълнено условието $A \geq B$, а N е общият брой на извършените експерименти.

Наборът от стойности за коефициента на устойчивост (F), с помощта на специално съставената компютърна програма "SAFETYG4". Чрез нея по случаен начин се генерира реда на срещаните разновидности и мощностите им в съответствие с емпиричните закони на разпределение.

За така моделирания откос се изчислява коефициентът на устойчивост при конкретен ъгъл на откоса $\alpha_i \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}]$ и височина $H \in [H_{min}, H_{max}]$. Стойностите на минималния и максималния ъгъл на откоса зависят от конкретните литоложки разновидности. За разглеждания случай се приема $\alpha_{min}=30^\circ$, $\alpha_{max}=70^\circ$. По стойностите на ъгъла на откоса, при интервал на изменение на височината на откоса $H_{min}=4m$, $H_{max}=17m$ се изчислява риска и се построява зависимостта $R=f(\alpha, H)$ (Фиг. 2.2).

За да се управлява в рискова ситуация, е необходимо да се отчетат съвместно две групи последствия, съответно при липса или при възможна проява на свличане. Към втората група спадат вреди, загуби и разходи за сигурност (инвестиции в предпазни мероприятия, обучение на персонала, застрахователни вноски и др.). Общата сума се означава с C . Другата група са благоприятните финансови последствия от наличието на рискова ситуация (например при по-голям ъгъл на борда ще се намали обема на откривка, разходите за заплащане на земеделска земя и др.). Общата сума в лева се означава с D . Вземането на конкретно решение зависи от поставената цел. За пояснение на това, нека общата средна "печалба" при наличие на риск да се означава с E . Тя е разлика от средните благоприятни финансови последствия $(1-R).D$ и средните неблагоприятни финансови последствия $R.C$, т.е. $E = (1-R).D - R.C = D - R(D+C)$. Естествено е така да бъдат подбрани стойностите на участващите три величини, че очакваната средна "печалба" да не е отрицателна, т.е.

$$D - R(D+C) \geq 0. \quad (2.1)$$



Фиг. 2.2. Зависимост между ъгъла, височината на стъпалото и риска.

Мениджърът в случай на рискова ситуация предпочита предварително да бъдат определени както финансовите средства, които се отделят за гаран-

тиране на сигурността и за покриване на евентуалните щети C , така и благоприятните финансови последствия D . В такъв случай той има възможност да разработи няколко варианта и в зависимост от целите на предприятието предлага един от тях. Например това може да стане с решаването на (2.1) относно една от променливите

$$R \leq \frac{D}{D+C}, C \leq \frac{D(1-R)}{R}, D \geq \frac{R.C}{1-R}.$$

Например ако приемем, че $D=4,5$ млн. лв., $C=3$ млн. лв. можем да получим

$$R \leq \frac{D}{D+C} = \frac{4,5}{4,5+3} = \frac{4,5}{7,5} = 0,60 = 60\%.$$

Следователно при този вариант всеки риск по-малък или равен на 60% е приемлив. При $R=60\%$ и ъгъл на откоса 45° , посредством построената фиг.2.2, се намира, че височината на стъпалото трябва да е до 13,3m.

2.4. Получаване на вероятността за устойчивост на откоси в строителни изкопи

Оценката на устойчивостта при проектиране и оформяне на откосите в реалния масив се затруднява от факта, че използваната изходна геотехническа информация има вероятностен характер.

В общия случай, ако се означае с A сумата на задържащите сили, а с B сумата на свличащите сили, то вероятността за устойчиво състояние на откоса се изразява като $S=P(A \geq B)$, а рискът (R) се определя от равенството

$$R = 1 - S$$

Анализът на известните изчислителни методи за оценка на устойчивостта на откосите показва, че двата параметъра (A и B) представляват функции на случайни величини.

Ето защо за пълното отчитане на наличната информация за изчисляване на A и B най-подходящ е методът на статистическото моделиране, Т.Н. Naylor [22]. При него за всеки вариант от комбинация на стойностите на изходните параметри, за A и B се получават определени стойности. Те характеризират статистически сигурността S и риска R в зависимост от физикомеханичните параметри на различните литоложки разновидности, геометрията на откосите и динамичните натоварвания.

Наличието на многослоен масив налага мощностите на отделните хоризонти да се представят с емпиричните им статистически разпределения, получени въз основа обработката на голям брой геодезични измервания.

За всеки хоризонт от откоса са изследвани в лаборатория обемната плътност (γ), ъгълът на вътрешно триене (φ) и кохезията (c) и са получени емпиричните им разпределения.

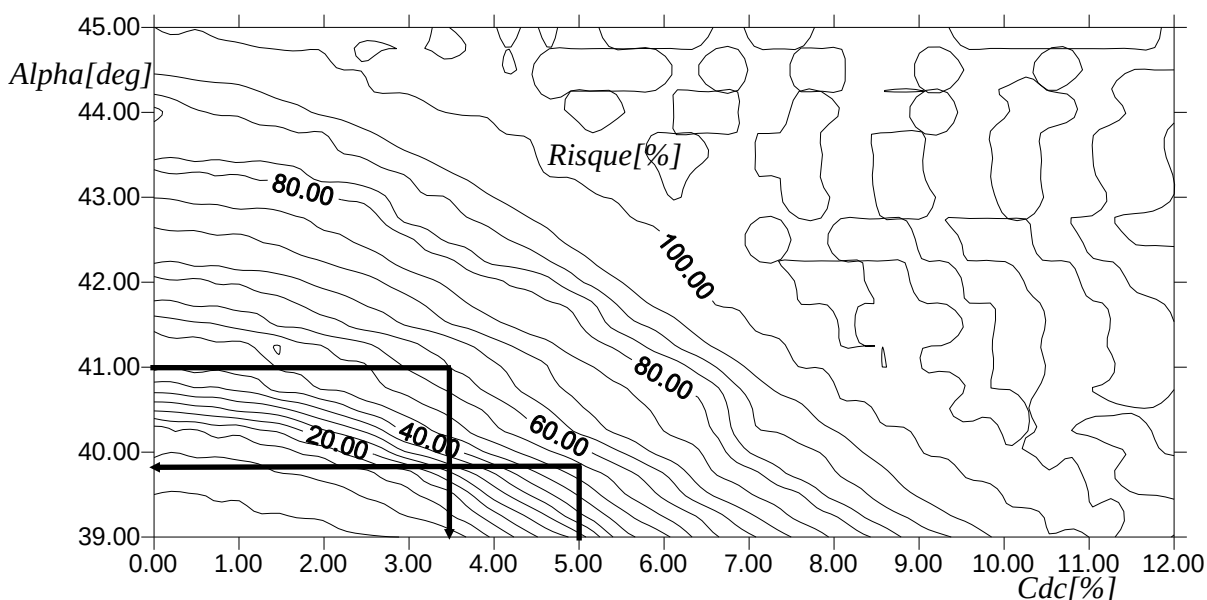
Моделирането на откоса се осъществява, като се отчита наблюдаваната честота на възможната последователност на срещане на литоложките разновидности в него. За разглеждания обект с честота 30% се наблюдава последователността (отдолу нагоре) "Черни органични глини", "Глини с пясък", "Синьозелени пластични глини" и с честота 70% - "Черни органични глини", "Синьозелени пластични глини", "Глини с пясък".

Тази информация служи за вход към програми SAFETYDDN и SAFTYSDN, които реализират статистическото моделиране съответно при детерминиран динамичен коефициент и при динамичен коефициент със случаен характер.

Методът Монте Карло се реализира в следната последователност. При конкретен ъгъл на откоса се генерира едната от двете последователности на подреждане на разновидностите и максималната стойност на дълбочината на изкопа. След това се получават мощностите на слоевете и се извършва проверка за достигната максимална дълбочина на изкопа. По-нататък се генерират стойностите на обемната плътност, ъгълът на вътрешно триене и кохезията съответно за всяка от литоложките разновидности на откоса. При отчитане на динамичните натоварвания, С. Трендафилов [10], задържащите и свличащите сили се коригират с динамичния коефициент C_{dc} .

Изследванията показват, че динамичните натоварвания затихват във височина по отрицателен експоненциален закон и практически оказват влияние в първия слой (черните органични глини). Ето защо само за този слой се прилага корекционния динамичен коефициент.

След многократно изпълнение на тази процедура се намира вероятността за свличане на откоса - риска. Получената зависимост между риска (R), корекционният динамичен коефициент (C_{dc}) и ъгъла на откоса (α) е дадена на фигура 2.3.



Фиг. 2.3. Зависимост между ъгъла на откоса, корекционния динамичен коефициент и риска.

Има строителни съоръжения, при които може да се управлява динамичното натоварване и ъгълът на откоса. Динамичното натоварване е известно, например при прокарване на разрезна траншея в открити рудници, в изкопите от пътното и високо строителство, тъй като се знае вида на механизация и транспортните средства.

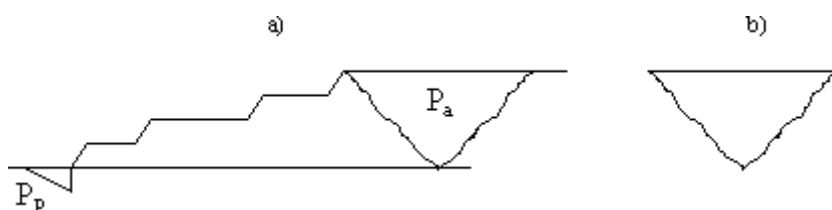
Ако има сериозни съображения стойността на ъгъла на откоса да е точно определена, то тогава ще се търси възможност за избор на механизация и транспорт такива, че динамичните натоварвания да са в допустимите граници. Възможна е ситуация, при която по зададени ъгъл α и риск R се търси стойността на коефициента C_{dc} . Например при $\alpha=41^\circ$ и максимално допустим риск $R=60\%$, посредством изобразената на фиг.2.3 зависимост може да се определи стойността на C_{dc} . Получава се, че най-голямото възможно динамично натоварване е 3,43%.

Обратно, ако $C_{dc}=5\%$, $R=55\%$ се намира $\alpha=39,81^\circ$, т.е. при зададеното динамично натоварване и максимален риск, стойността на ъгъла на откоса трябва задължително да е до $39,81^\circ$.

2.5. Определяне на риска при работа на роторни багери в условията на свлачищни деформации и свлачища в открити рудници

Свлачищните деформации и свлачищата представляват голям проблем при експлоатацията на въглища в открити рудници. Обикновено се работи в надвъглищния комплекс и въглищните пластове със големи багери, които попадат често в сложни геотехнически условия. Те се свеждат в следното:

Различни видове дефекти (пукнатини), които се мобилизират при работа на багерите. По своя генезис пукнатините биват: литификационни, микро- и мезопукнатини, мрежовидно разположени в масива (Q_I); мезо- и макropукнатини от диагенетичен и тектонски произход (Q_{II}); огледални макropукнатинни повърхнини (Q_{III}). При възникване на свлачища процесът се извършва по схемата на призма на активен земен натиск, централен блок и пасивна призма (фиг. 2.4a). При мобилизиране на литификационните пукнатини (дефекти) призмата на активен земен натиск се оформя по образователната повърхнина (фиг. 2.4b).



Фиг. 2.4

Повърхнината е вълнообразна поради мрежовидното разпределение на микро- и мезопукнатините в общия обем на надвъглищния и на въглищния комплекс. Макropукнатините, особено във въглищата довеждат до блоково откъсване. Огледалните повърхнини в основата на бордовете са свързани с деформирането им. Тези повърхнини са наклонени към отработеното пространство, към масива или са хоризонтални.

В профила на надвъглищния комплекс има водонаситени лещи, които при пресичането им оводняват откосите. Валежите от дъжд и снеготопене мокрят повърхнините не пукнатините и намаляват тяхното съпротивление и съответно устойчивостта на откосите.

Решаването на проблема за оценка на технологичния риск при работа на големите роторни багери има комплексен характер:

Роторните багери (RS 2000 и RS 1200) работят в ненарушения масив от надвъглищния комплекс и въглищните пластове. Често багерите попадат в близост със призмата на активен земен натиск, която е склонна към реологични деформации.

Вибрирането на багерите върху работните площадки мобилизират по различен начин дефектите. Динамичните натоварвания заедно с гравитачните сили нарушават нормалната работа на багерите.

За запазване на сигурността на роторните багери се прави следното:

Маркшайдерски наблюдения за реологичните свлачищни процеси в масива, предизвикани от дефекти и води;

Ежедневно наблюдение от багеристите, от началниците на смени и началниците на участъци;

При възникване на свлачищни деформации, даже с малък обхват се извършва незабавно изместване на багерите извън опасната зона с възможност за най-малко нарушаване на технологичния процес.

Разглежданите дефекти Q_I , Q_{II} и Q_{III} се характеризират с емпиричните им закони на разпределение, представени във вид на хистограми.

За оценка на технологичния риск при роторни багери се предлага вероятностен модел, при който посредством статистическо компютърно моделиране се получават стойности на Q_I , Q_{II} , Q_{III} и W за C и γ (приема се, че ъгълът ϕ почти не се влияе).

По определена схема се получава коефициент на устойчивост $F = f(C, \gamma, \phi)$. Посредством многократно проиграване (N пъти) на вероятностния модел се получават множество стойности за F . Нека броят N_1 се отнася за случаите, когато $F < 1$. Тогава като оценка за риска (R) се приема $R = \frac{N_1}{N}$. А сигурността ще бъде равна на $1-R$.

Ако A са годишните приходи за конкретен обект, B са годишните щети при настъпване на неблагоприятно събитие, тогава средноочакваните приходи (E) се дават с формулата:

$$E = R.A + (1 - R).B$$

Това дава възможност на мениджърите на предприятието за добив да направят реална оценка за риска и евентуалните приходи в откритите рудници с големи роторни багери.

2.6. Намиране и изследване значението на риска при анализ на устойчивостта на откоси в многослойна среда

Експлоатацията на големите открити въглищни рудници в България е свързана със значителни свлачищни явления. Въглищните пластове са от плиоценски произход и са отложени между многослоен глинест комплекс, който е склонен към деформации на пълзене и намаляване на якостта във времето. Многослойният масив се характеризира с променливи физични, якостни и деформационни свойства във вертикалния профил и в латерално отношение. Тези променливи свойства, заедно със специфичната, сложна технология на разработване на рудниците, представляват комплексни неблагоприятни условия и фактори. Технологичният процес е придружен винаги с дълговременни деформации, които умело се управляват от минните инженери.

Управлението на деформациите става чрез непрекъснати наблюдения на геодезични репери, разположени в профил върху работните и неработните бордове. Въз основа на тези наблюдения и познаването на свойствата на литоложките разновидности се извършват изчисления на устойчивостта по методи, подходящи за многослойната среда, Г. Георгиев [2], Г.Л. Фисенко [11].

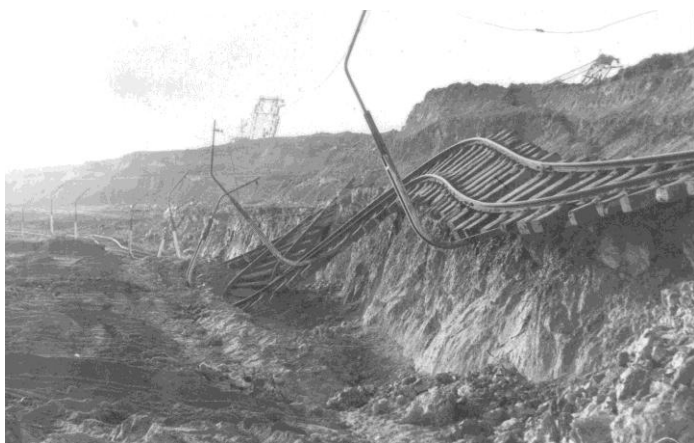
В резултат на използването на непълната информация за масива и влиянието ѝ върху работата на изкопната механизация, възникват големи свлачищни явления, които в много случаи частично разрушават рудника и нарушават нормалния ритъм на работа (фиг.2.5 и фиг.2.6).

Става ясно, че се работи в условия на вероятностна среда. В този случай

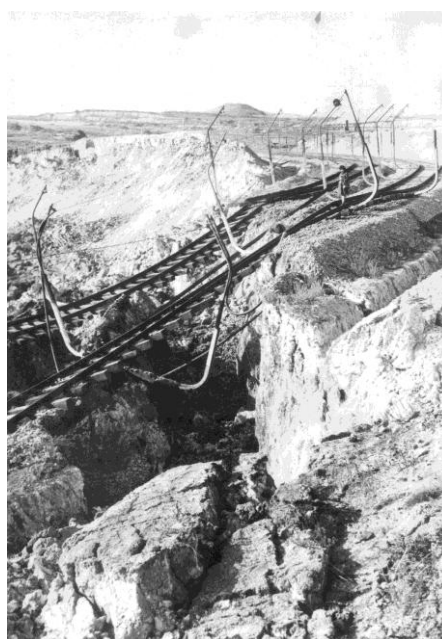
всяко решение по отношение на устойчивостта е свързано с някакъв риск.

Например, в реални условия, трето открито стъпало в рудник "Трояново-Север" при стандартните изчисления на устойчивостта се приема, че е изградено от синьозелени глини, т.е. стъпалото е хомогенно. В действителност, при използване на фотограметрична апаратура се установява, че то е изградено от различни слоеве (глини, пясъци, варовити включения и др.). Ако се подхожда по избиращ и субективен начин ще се получи широка зона за коефициента на устойчивост F във функция от височината на откоса H , което ни поставя в рискова ситуация.

В случай на използване на детерминирани математически методи и модели не винаги се получават желаните резултати - изчислява се по даден профил коефициент на устойчивост F по-голям от единица, а се появява свлачищен феномен. Обратно, при коефициент на устойчивост $F = 0,9$ стъпалото е стабилно, дори без дълговременни деформации.



Фиг. 2.5.



Фиг. 2.6

За конкретните условия, най-подходящ е методът на имитационното моделиране, при който за всеки вариант на съчетаване на стойностите на изходните параметри (природни и технологични) за коефициента на устойчивост F се получава определена стойност. Съвкупността от тези стойности статистически характеризира коефициента на устойчивост F в зависимост от параметрите на различните литоложките разновидности и геометрията на стъпалото.

Въз основа на обработката на голям брой геодезични измервания за мощностите на седиментите са получени статистическите им разпределения. За облекчаване на модела и изчислителните процедури, данните за физичните и якостни свойства са приети за константни величини.

На базата на разработен алгоритъм е съставена собствена компютърна програма "SAFETYG4". Чрез тази програма по случаен начин се генерират реда на срещаните разновидности и мощностите им в съответствие със законите им на разпределение.

За всеки компютърен експеримент се получава възможен геоложки профил,

за който чрез съответна подпрограма се изчислява коефициента на устойчивост F .

След реализиране на определен брой компютърни експеримента се получават набор от стойности за коефициента на устойчивост F , задържащите ZA , свличащите SV сили и др. Оказва се, че резултатите от имитационното моделиране се групират добре около линия, която се описва с регресионно уравнение от вида $F = \frac{1}{a + b.H}$. Посредством метода на най-малките квадрати

е намерена следната зависимост $F = \frac{1}{0,371469 + 0,0557761.H}$.

Резултатите, получени по този израз се съгласуват добре с периодичните проверки на устойчивостта в рудника.

Като се използва графоаналитичния метод за изчисляване на риска, B.S. Dhillon, S. Chanan [17], след отчитане на законите на разпределение на свличащите и задържащите сили, за разглеждания трети откритен хоризонт се изчислява надеждност $R=0,63$ и съответно риск за неустойчивост $1-R=0,37$.

2.7. Определяне посоката на работния фронт при добив на скални облицовъчни материали с отчитане вероятностният характер на напукаността

В последните десет години в световен мащаб, търсенето на скално облицовъчни материали почти се е удвоило. Съществуващите у нас находища са с много добри декоративни и технически качества, имаме добър опит относно добива и традиции в преработването. Добивът обикновено се осъществява по открит начин. Конкурентната среда, в която попадна нашето производство изискват и нови проектни, технически и технологични.

Един от най-важните показатели при разработването на находища на скално облицовъчни материали е фактическият коефициент на извличане на блокове, наречен рандеман. Стремешът е коефициентът на извличане да е по-висок, което всъщност означава размерите на добитите блокове да са по-големи.

Естествената напуканост на скалния масив е природна даденост, която има ясно изразен вероятностен характер, с което трябва да се съобразим. Естествената блоковост, като функция на елементите на пукнатините, има също такова поведение. При проектиране на открити рудници за добив на блокове, посоката на работния фронт трябва да се определи така, че във възможно най-голяма степен да се запази естествената блоковост. Тази посока наричаме оптимална. Тя също е функция на елементите на естествената напуканост и следователно има стохастичен характер.

Поставя се задачата да се построи математичен модел, който да позволи да оценим възможните посоки на фронта на минните работи и по определен критерий да изберем оптималния. За да се направи това, трябва да се отчетат естествената напуканост на масива и нейният вероятностен характер, допълнителното нарушаване на естествената блоковост вследствие намесата на човека, ограниченията за подход към кариерата и др.

При детерминирани показатели на системите пукнатини този въпрос е решен в предходни разработки. Тук се прилага статистическото моделиране за намиране оптималната посока на работния фронт. За целта се имитират

стойностите на двумерните случайни величини (ξ_i, ψ_i) , $i=1,2,\dots,k$, където k е броят на системите пукнатини, ξ_i е „Ъгъл на разпространение“, ψ_i - „Ъгъл на залягане“ на i -та система пукнатини, като предполагаме, че са зададени съответните k съвместни разпределения $F_i(x_i, y_i)$. След това по указания детерминиран модел се намира оптималния фронт O_p на минните работи. Този процес се изпълнява многократно, при което се получават определен брой реализации. В съответствие с основната идея на статистическото моделиране, се преминава към намиране на оценки на определени характеристики (математическо очакване, мода, медиана и др.) на величината O_p .

Особеност на изследвания процес е, че случайната величина O_p се оказва двумодална и е удачно да се намерят оценки за модите, а не за математическото очакване.

Съставена е компютърна програма, основният изчислителен модул на която е наречен OPTFRONT.

По изложения алгоритъм са решени редица примери.

Получените резултати дават възможност да се направят някои изводи:

- отчитането на вероятностния характер на напукаността обогатява значително информацията за нарушенията в масива и е основа за по-правилни анализи, оценки и заключения;

- съставеният модел отчита добре характера на напукаността на скалите и може с успех да се използва при проектиране на кариери.

2.8. Намиране екстремалните стойности на коефициента на устойчивост по метода на случайното търсене

Една от основните задачи при проектиране и експлоатация на открити рудници е осигуряване на устойчивостта на работните, неработните бордове, насипищата и прилежащата инфраструктура. За източномаришките открити рудници това е съществен въпрос, тъй като се работи в слаби скали, на големи площи и със значителни изменения на свойствата във вертикално и латерално отношение, т.е. при сложни инженерногеоложки условия. Картината допълнително се усложнява като се има предвид влиянието на миннотехническите и минно технологичните фактори.

Тук е прието разбирането под устойчивост на борда да се счита неговата способност да се противопостави на въздействието на различни външни сили и да запазва функциите си продължително време.

Много от широко известните методи за определяне на устойчивостта позволяват да се намери в масива формата и положението на плъзгателната повърхнина, във всяка точка от която е спазено условието за гранично равновесие на Кулон. Избраният метод трябва да позволява намиране на най-слабата повърхнина на плъзгане при спазване на статичното равновесие.

Така при метода на Фисенко, ако скалния масив по определен начин е разделен на n блока, то коефициентът на устойчивост се определя посредством функцията

$$F(\gamma, \varphi, c) = \frac{\operatorname{tg} \varphi \sum_{i=1}^n P_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^n c l_i}{\sum_{i=1}^n P_i \sin \alpha_i}. \quad (2.2)$$

където:

P_i [t] е теглото на i -ти блок;

α_i [...°] - ъгъл на наклона на линията на плъзгане в основата на i -ти блок;

φ [...°] - ъгъл на вътрешно триене на масива;

c_i [t/m²] – кохезията в масива на i -ти блок;

l_i [m] – дължината на линията на плъзгане на i -ти блок.

При избрано разделяне на масива на блокове, анализа на израза (2.2) показва, че F е функция на обемното тегло (използва се при пресмятане на P_i), ъгъла на вътрешно триене и кохезията. Стойностите на тези величини се изменят в определени граници и често се приема, че имат в този интервал равномерно вероятностно разпределение, т.е. на равни дължини вероятностите остават едни и същи. При спазване на определени условия и фиксирани стойности на показателите γ_0 , φ_0 и c_0 , изчислителният метод на Фисенко и други, подобни на него, дават възможност с висока достоверност да се определи положението на плъзгателната повърхнина, т. е. повърхнината с минимална стойност $F_{\min}(\gamma_0, \varphi_0, c_0)$ на функцията (2.2), която стойност е прието да се нарича коефициент на устойчивост.

От тук става ясно значението на това да се намерят минимума $\min F_{\min}(\gamma, \varphi, c)$ и максимума $\max F_{\min}(\gamma, \varphi, c)$ на коефициента на устойчивост, при възможно изменение на изчислителните показатели в определените граници. Заедно с това е важно да се намерят и съответните повърхнини на плъзгане. Такава многомерна задача е трудно да се реши с традиционните средства на математиката. За целта могат да се използват съвременни методи за оптимизиране. В разглежданият случай целевата функция (2.2) е известна и могат да се приложат градиентни методи, методите на случайното търсене и други.

За намирането на минимума $\min F_{\min}(\gamma, \varphi, c)$ и максимума $\max F_{\min}(\gamma, \varphi, c)$ на коефициента на устойчивост $F_{\min}(\gamma_0, \varphi_0, c_0)$ тук е използван метода на случайното търсене с обратна стъпка.

Съставен е алгоритъм и компютърна програма наречена METSLUT, с помощта на която е решена задача за определяне положението на плъзгателната повърхнина в открито стъпало, изградено от сини глини за условията на мини „Марица изток“ при следните условия:

- височина на откритото стъпало 12m;
- ъгъл на откоса 53°;
- стойностите на физичните и якостни показатели са дадени в таблица 2.5. Използвани са традиционните означения γ , φ и c , съответно за обемна плътност, ъгъл на вътрешно триене и кохезия.

Таблица 2.5. Стойности на физичните и якостни показатели

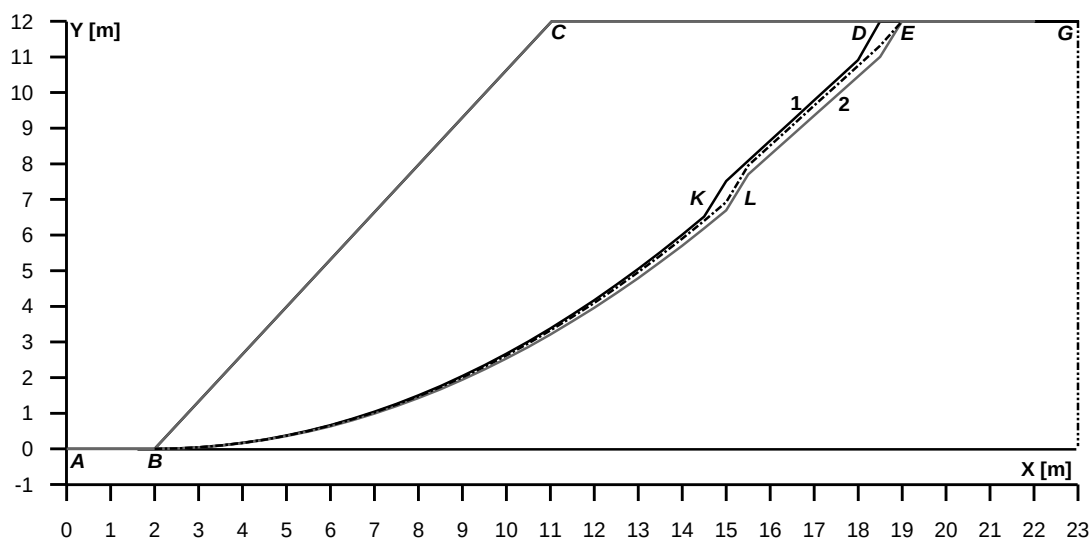
Означение	Минимална стойност	Максимална стойност	Средна стойност
γ [t/m ³]	$\gamma_{\min} = 1,70$	$\gamma_{\max} = 2,00$	$\bar{\gamma} = 1,85$
φ [...°]	$\varphi_{\min} = 5$	$\varphi_{\max} = 8$	$\bar{\varphi} = 6,5$
c [t/m ²]	$c_{\min} = 3$	$c_{\max} = 6$	$\bar{c} = 4,5$

За задачата, представена по-горе, резултатите са илюстрирани графично на фигура 2.7. Плъзгателната повърхнина BKD съответства на минималната стойност $\min F_{\min}(\gamma, \varphi, c) = 0,86$ на коефициента на устойчивост. Тя е получена при $\gamma = 1,71 t/m^3$, $\varphi = 5,44^\circ$, $c = 5,96 t/m^2$. Максималната стойност $\max F_{\min}(\gamma, \varphi, c) = 1,75$ е намерена по плъзгателна повърхнина BLE , при което съответните стойности на физичните и якостни показатели са $\gamma = 1,99 t/m^3$, $\varphi = 7,06^\circ$, $c = 3,02 t/m^2$.

Нека се предположи, както често се прави на практика, че за изчисляване устойчивостта на стъпалото се използват средните стойности $\bar{\gamma} = 1,85 t/m^3$, $\bar{\varphi} = 6,5^\circ$, $\bar{c} = 4,5 t/m^2$ на показателите. Съответната плъзгателна повърхнина на фигура 2.7 е изобразена с пунктирна линия между линии BLE и BKD . Тогава коефициента на устойчивост се получава $F_{\min}(\bar{\gamma}, \bar{\varphi}, \bar{c}) = 1,28$, т. е. стъпалото би трябвало да е в устойчиво състояние. Но ако, в рамките на зададените граници, съчетанията на стойностите на свойствата е такова, че $F_{\min}(\gamma, \varphi, c) < 1$, както например при $\min F_{\min}(\gamma, \varphi, c) = 0,86$, то стъпалото ще бъде в неустойчиво състояние! Това е напълно възможна ситуация с която са се срещали често специалистите в тази област.

Плъзгателната повърхнина BKD отговаря на минималната стойност $\min F_{\min}(\gamma, \varphi, c) = 0,86$, а BLE на максимума $\max F_{\min}(\gamma, \varphi, c) = 1,75$ на коефициента на устойчивост $F(\gamma, \varphi, c)$ не при фиксирани стойности на изчислителните показатели, а при възможното им изменение в зададените в таблица 2.5 граници, т. е. със сигурност са изпълнени неравенствата

$$\min F_{\min}(\gamma, \varphi, c) \leq F_{\min}(\gamma, \varphi, c) \leq \max F_{\min}(\gamma, \varphi, c).$$



Фиг. 2.7. Плъзгателни повърхнини: BKD , при която $\min F_{\min}(\gamma, \varphi, c) = 0,86$; BLE с коефициент на устойчивост $\max F_{\min}(\gamma, \varphi, c) = 1,75$; с пунктир е повърхнината, където $F_{\min}(\bar{\gamma}, \bar{\varphi}, \bar{c}) = 1,28$

Решените примери дават основание да се заключи, че метода на случайното търсене може с успех да се прилага в редица практически задачи, където се търси екстремум на определена целева функция на много аргументи със зададени ограничения. При това е възможно, както целевата функция, така и ограниченията да са нелинейни.

2.9. Имитационен модел за прогнозиране на производителността на сонда

Пробивните работи са първият технологичен процес при откритото разработване на здрави скали и полезни изкопаеми. Те предхождат взривните работи и заедно с тях имат за цел да създадат благоприятни условия за работа на транспортната и насипищната техника.

Основната цел на процеса пробиване е прокарване на сондажи в масива за осигуряване на процеса взривяване. Пробивните работи в откритите рудници се използват и за вземане на проби при проучването, прокарване на дренажни сондажи и др.

В процеса на проектиране на пробивно-взривните работи в един открит рудник, или кариера е необходимо сравнително точното определяне на производителността на използваната сонда. Тя оказва влияние върху броя на необходимите сонди, а оттам и върху своевременната подготовка на взривните полета и ритмичността на работата. Недостатъчният брой сонди и неефективното им използване могат да доведат до реализация на излишни престои на изкопната механизация, а необоснованото увеличаване броя на сондите води до преразход на средства.

Производителността на сонда с въртливо пробиване може да се определи като се използва следния детерминиран модел, Д.С. Стоянов [9]:

$$Q_{cm} = \frac{60}{t_1 + t_2} \cdot T \cdot K_E, m / \text{смяна}, \quad (2.3)$$

където: T е продължителността на смяната, h ;

t_1 - чистото време за пробиване на 1 линеен метър сондаж, min / m ;

t_2 - времето за спомагателни операции, отнесени към 1 лин. метър сондаж, min / m ;

$t_2 = t_3 + t_4$, min / m ;

t_3 - времето за прехващане на щангата при спускане и изваждане от сондажа, min ;

t_4 - времето за завинтване и отвинтване на щангата, min ;

K_E - коефициентът на използване на работното време на сондата

$$K_E = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_5 + t_6};$$

t_5 - времето за преместване на сондата на нов сондаж, отнесено към 1 линеен метър сондаж, min / m ;

t_6 - времето за случайни престои отнесено към 1 линеен метър сондажи, min / m ;

Използваните параметри в детерминирания модел (2.3) по своя характер са вероятностни.

В резултат на посочените причини, за един час чисто работно време производителността на сондата с въртливо пробиване се изменя в доста широки граници – от 10 до 150 m/h .

За да се отчетат адекватно условията, от които зависи производителността на сондата, могат да се използват определен брой поддаващи се на сравнително точно измерване времена, при което да се отчете вероятностният им характер. В резултат на това детерминирания модел на производителността

на сондата се превръща във вероятностен.

В този случай е необходимо да се използват методите на математическото моделиране и по-специално статистическите модели. Използването на статистическото имитационно моделиране за изследване на определен обект, изисква познаването на вероятностните закони на разпределение на участващите случайни фактори. Тук те се представят чрез кумулативните функции $F_{t_i}(t)$, т. е. с кривите на натрупаните относителни честоти на случайните времена t_i .

Имитационното моделиране на производителността на сондата за условията на рудник "Република" е осъществено с компютър по съставен за целта алгоритъм. Въз основа на него е съставена собствена компютърна програма SONDA на алгоритмичен език Фортран. С нея са получени конкретни резултати при различен брой на експериментите. Сравняването на резултатите за целия период на наблюдение показва, че при реално достигнатата средна производителност 144 m за смяна, с имитационния модел е получен среден резултат от 150 m/смяна при $N_{br} = 5000$. Грешката допусната при моделирането е 4,16%.

ГЛАВА 3. ПРИЛОЖЕНИЕ НА СТАТИСТИЧЕСКОТО МОДЕЛИРАНЕ ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧИ В ПОДЗЕМНИЯ ДОБИВ

3.1. Определяне на класификационните характеристики на скалния масив посредством статистическото моделиране

Изборът на система на разработване и добивна технология зависи от множество природни и минно-технически фактори. Първостепенно значение имат тези, от които зависи устойчивостта на рудата и страничните скали. Степента на устойчивост определя приложимостта на една от трите възможни технологии: с открито добивно пространство; със запълване; с обрушаване. Когато природните фактори имат голяма степен на изменчивост, задачата за избор на оптимална добивна технология значително се усложнява. Не са рядко случаите, когато в обекти с близки природни условия се прилагат различни системи на разработване без да има сериозни аргументи за избора на даденото техническо решение. Един от ефективните и обективни начини за избор на система на разработване, съответстващ на реалните природни условия, е използването на класификационните характеристики на масива. В детерминиран вид те могат да се прилагат, когато определящите ги фактори не се изменят в широки граници. На практика това може да се случи твърде рядко. Както входящите показатели, така и съответните на тях класификационни характеристики имат случаен характер. Затова в процедурите за избор на техническо решение рисковият фактор е винаги на лице. Оценката на риска в съчетание с статистическото моделиране на случайни природни фактори е един от съвременните подходи за избор на оптимално добивна технология, на който е посветена настоящата разработка.

От известните класификационни характеристики за качеството на скалния масив широко приложение намират: Rock Tunneling Quality Index, Q; Rock Mass Rating (RMR) System. Към тях следва да се прибави и Stability Number, N' , който е един от двата основни фактора, използвани в the Stability Graph Method.

3.1.1. Rock Tunneling Quality Index, Q

Тази класификация е създадена през 1974 година в Norwegian Geotechnical Institute. Нейни автори са N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde [14]. Балната оценка за качеството на скалния масив се определя с израза

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}, \quad (3.1)$$

където RQD е качеството на сондажната ядка, J_n е броят на системите пукнатини, J_r характеризира състоянието (грапавостта) на стените на пукнатините, J_a отчита промените на повърхнините на пукнатините, J_w характеризира степента на оводненост на средата, SRF отчита съотношението между ефективните напрежения и якостните свойства на скалния масив.

Q - класификацията е подходяща за използване при оценка на качеството на скалния масив около единични минни изработки. При подземно разработване на рудни находища тя се прилага при избора на начин на подготовка и схема за разполагане на подготвителните изработки спрямо контурите на рудните тела. Същевременно входящите параметри RQD, J_a , J_n , J_w , J_r , SRF се изменят в широки граници и имат случаен характер. Това налага класификационният показател Q да се разглежда също като вероятностна величина със свое емпирично разпределение. На всяка стойност на Q съответства определен начин за поддържане на подготвителните изработки. Изборът на един или друг начин на подготовка се характеризира с различна вероятност, а това означава и различна степен на поетия риск.

3.1.2 Rock Mass Rating (RMR) System

Класификацията **RMR**, създадена от Z.T. Bieniawski [15], се използва за оценка на устойчивото състояние на открити добивни пространства с различна форма, големина и срок на експлоатация. Класификационната оценка RMR се определя въз основа на следните 6 фактора: A_1 - якост на едноосов натиск; A_2 - качество на сондажната ядка, RQD; A_3 - разстояние между пукнатините; A_4 - състояние на стените на пукнатините; A_5 - степен на оводненост на средата; B - параметър, отчитащ влиянието на ориентацията на пукнатините.

Балната оценка по класификацията RMR се определя съгласно израза

$$RMR = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + B. \quad (3.2)$$

Системата RMR успешно се прилага при оценка на устойчивото състояние на горнището и долнището на добивни камери при разработване на стръмно залягащи рудни жили, както и на тавана на добивните камери при разработване на хоризонтални и полегати пластови находища. Класификацията RMR позволява да се оценят възможностите за използване на незакрепени открити пространства в зависимост от Unsupported Stand-up Time. Използването на незакрепени камери представлява определен технологичен риск. Той може да бъде оправдан и ще доведе до определен икономически ефект само ако не настъпи рисковото събитие - обрушаване на стените на откритите добивни пространства. Входящите параметри за изчисляване на RMR се характеризират с голяма степен на изменчивост и това налага използване на вероятностен подход.

3.1.3. Stability Number, N'

Разработеният през 1981 година the Stability Graph Method намира приложение при избора на добивна технология и при определяне на начина на поддържане на добивното пространство. Процедурата се основава на два фактора: Stability Number, N' и Hydraulic radius S of the slope. Stability Number, N' характеризира реалните природни условия. За неговото определяне се използва изразът:

$$N' = Q' \times A \times B \times C, \quad (3.3)$$

където Q' е модифицираната Q класификация, A е параметър, отчитащ напрегнатото състояние на масива, B е параметър, отчитащ ориентацията на пукнатините, C е параметър, отчитащ характера на нарушенията под влияние на гравитационните сили.

The Modified Tunneling Quality Index Q' се определя по начин аналогичен на стандартната NGI класификация, като факторите SRF и J_w приемат стойност единица.

Факторите участващи в израза (3.3) за определяне на числото на стабилност N' имат случаен характер. В такъв случай самият показател N' също следва да се разглежда като вероятностна величина. Фактът, че N' се изменя в широки граници показва, че използването на детерминиран подход е неподходящо, тъй като получените стойности и тяхното по-нататъшно интерпретиране могат да доведат до изводи и заключения несъответстващи на реалната природна среда. Следователно технологичният риск и очакваните технико-икономически показатели на прилаганата система на разработване са тясно свързани помежду си. Обикновено по-големият риск е предпоставка за по-голям икономически ефект на избраното техническо решение.

3.2. Вероятностен подход при определяне на Q , RMR, N' , като основа за оценка на риска

В най-общ вид всяка класификационна характеристика на скалите (C_c) може да се представи във вида

$$C_c = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

където $x_1, x_2, \dots, x_n$ са факторите, участващи при изчисляване на балната оценка.

Факторите $x_1, x_2, \dots, x_n$ имат вероятностен характер с определени теоретични или емпирични закони на разпределение. Тогава задавайки различни стойности на $x_1, x_2, \dots, x_n$ ще се получи множество от стойности на класификационната характеристика C_c . В конкретния случай е използван метода Монте-Карло. За всяка от класификационните характеристики е получена съответна извадка от стойности, която представлява емпиричния закон на разпределение. Именно той стои в основата на последващия анализ на вероятността за възникване на едно или друго събитие, както и рискът R , който се поема при вземане на съответното решение. Ако вероятността за реализиране на нежелано събитие е R , то вероятността за реализиране на благоприятно събитие ще бъде $G = (1 - R)$. Нека A са разходите за премахване на последствията от неблагоприятно събитие, а B са приходите, които ще се получат ако не се реализира неблагоприятното събитие. За да бъде рискът приемлив е необходимо да бъде спазено условието:

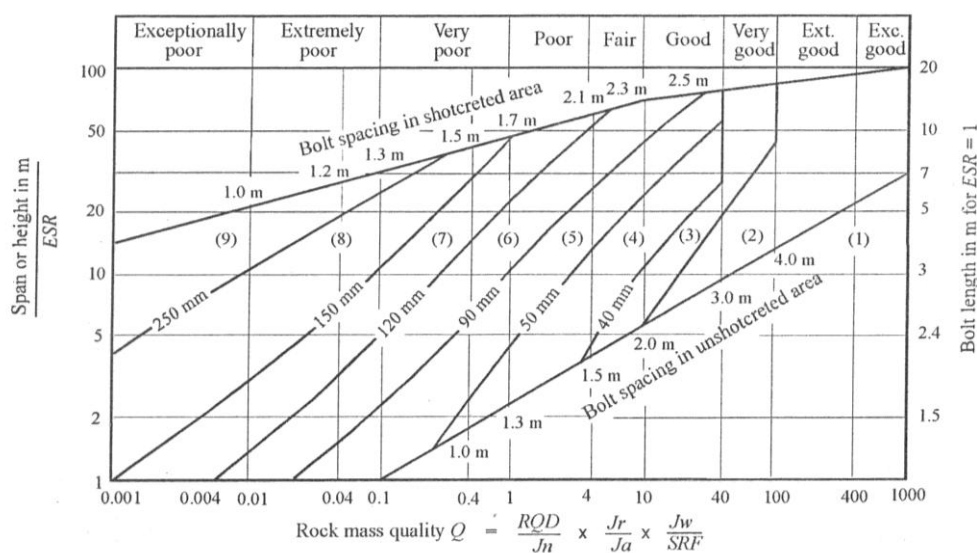
$$(1-R) B - RA \geq 0$$

Смисълът на управление на риска представлява определянето на неговата оптимална стойност по отношение на защитаващите ресурси и последствията при евентуално реализиране на неблагоприятно събитие.

Таблица 3.1

S[m]	ESR	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,0	4,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3,5	3,0	0,984	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000
4,0	1,3	0,932	0,000	0,000	0,044	0,008	0,000	0,000	0,016	0,000
4,5	1,6	0,950	0,000	0,000	0,026	0,008	0,000	0,000	0,016	0,000
5,0	1,0	0,701	0,000	0,141	0,126	0,011	0,010	0,000	0,000	0,011

На фиг.3.1 е показана графиката, характеризираща различните начини за закрепване на единични изработки според Rock Tunneling Quality Index, Q, използвана от Е. Ноек, Р.К. Kaiser, W.F. Bawden [19]. Извършено е моделиране по метода Монте Карло посредством създадената за целта компютърна програма QFACTMMK. В резултат са получени вероятностите за попадане във всяка една от деветте възможни зони за закрепване при определена ширина (височина) на изработката и Excavation Support Ratio, ESR. В таблица 3.1 са показани и резултатите от моделирането при ширина на изработките 3.0, 3.50, 4.0, 4.50 и 5.0m и ESR = 4, 3, 1.6, 1.3, 1.6 и 1 за условията на рудник А. С използваните статистически разпределения на величините RQD, J_n , J_r , J_a , J_w са получени стойностите на Rock Tunneling Quality Index, Q. За конкретният обект А прави впечатление високата вероятност, с която стойностите на Q попадат в зоната неизискваща закрепване на подготвителните изработки. При Span = 3,0m и ESR = 4,0 е налице абсолютна сигурност т.е. риск практически не съществува.



Фиг 3.1. Диаграма за начините за закрепване на единични изработки според Rock Tunneling Quality Index, Q

Аналогична диаграма на тази от фиг. 3.1 характеризира Unsupported Limits в зависимост от Bieniawski's Rock Mass Rating, RMR System. Диаграмата е използвана от D.J. Hutchinson, M.S. Diederichs [20]. В нея са обособени 9 зони,

въз основа на които са определя ширината на откритите добивни пространства в зависимост от срока на тяхната експлоатация (тяхното съществуване). С помощта на създадената компютърна програма RMRMMK е извършено моделиране по метода Монте Карло. В резултат са получени вероятностите за използване на незакрепени камери в зависимост от тяхната ширина и срока на съществуване.

Аналогична диаграма на тази от фиг. 3.1 се прилага и при използване на Stability Number, N' и Hydraulic radius S of the slope. Тук зоните са 5 и са номерирани от 1 до 5. Посредством създадената компютърна програма NPRIMMK, е извършено моделиране по метода Монте-Карло. Въз основа на вероятностните разпределения на RQD , J_n , J_r , J_a , както и на факторите A , B , C е определена извадката от стойности на числото на стабилност N' .

Извършените изследвания показват, че статистическото моделиране (Метод Монте-Карло) е един съвременен подход, посредством който може с висока степен на достоверност да се оцени избрания риск при вземане на конкретни технически решения, свързани с прилагането на една или друга добивна технология.

3.3 Постановка и решаване на задачата за определяне на N' с прилагане на статистическото моделиране

При разработване на стръмно-залягащи находища дебелината на рудното тяло и физико-механичните свойства на рудата и страничните скали са едни от най-строгите ограничаващи условия при определяне на начина за извършване на добивните работи в блока. Най-благоприятни условия за разработване, респективно най-добри технико-икономически показатели се постигат при устойчиви руди и странични скали и дебелина на рудното тяло над 5 m. Създават се предпоставки за висока интензивност на добивните работи при незначително обедняване, което е характерно за камерните системи с отбиване от подетажни изработки. С намаляване на степента на устойчивост на страничните скали става невъзможно прилагането на системи с открито добивно пространство. Тогава рязко се увеличава делът на технологиите с подетажно обрушаване. По степен на интензивност те не отстъпват на технологиите с открито добивно пространство, но същественият им недостатък е обедняването на рудата, тъй като източването на по-голямата част от рудата се извършва при наличие на контакт с обрушени скали.

Следвайки резултатите от предишни изследвания се установява, че е налице зависимостта $N' = f(S)$, където S е хидравличният радиус на създаденото открито пространство. От своя страна $S = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)}$, където a и b

са двата взаимно перпендикулярни размера на откритото пространство. В такъв случай ако a е размерът, съответстващ на дължината на добивния блок, а b е размерът, съответстващ на хоризонталната дебелина на рудното тяло, може да се определи степента на устойчивост на тавана на добивното пространство в зависимост от избраната дължина на блока и дебелината на рудното тяло (респ. ширината на слоя). Дебелината на рудното тяло следва да се разглежда като случайна величина. В такъв случай, хидравличният радиус S също ще бъде случайна величина. В предходни разработки изборът

на дадено техническо решение се основава на фиксирана стойност на величината S . Тук S се разглежда като случайна величина, което осигурява възможност за по-детайлен анализ на възможните решения. Предлагащата процедура оценява вероятностния характер на природните фактори, както и нивото на поемания риск при окончателния избор на добивна технология за конкретни природни и минно-технически условия.

При избор на оптимално техническо решение критерия за оценка следва да отчита приходите (D), разходите (E) и нивото на поемания риск (R). Стойностите на тези три параметъра дават възможност да се определи очакваната средна печалба Q като разлика между очакваните средни приходи и средни разходи:

$$Q=(1-R).D-R.E=D-R(D+E). \quad (3.4)$$

Очакваните приходи (D) са обикновено по-големи при работа в условия на по-голям риск. Това са например приходи при експлоатация на по-големи добивни пространства, намаляване на инвестициите за предпазни мероприятия и др. Разходите (E) са финансови средства за погасяване на загуби, премахване на последствията от причинени вреди и разходи за сигурност (инвестиции в предпазни мероприятия, обучение на персонала за реагиране при настъпване на нежелано събитие и др.). Рискът (R) е вероятността за сбъждане на нежелано събитие. Тук е възприета следната последователност за получаването му. Разглеждат се двете величини – N' (числото на стабилност) и S (хидравличният радиус).

Двете случайни величини N' и S , разгледани съвместно представляват двумерна случайна величина $X=(N'; S)$. В настоящата работа с помощта на компютърната програма NPRIMMK е приложен метода Монте-Карло, в резултат на което след отчитане на законите на разпределение на N' и S е получено множество стойности на X . То представлява емпиричният закон на разпределение на тази случайна величина. Сега не е трудно да се намери и риска при възприемане на съответна.

Като са възприети определени стойности за величините D и E , както и получените стойности за R и Q за случай, отговарящ на работа в условията на здрави скали, е направен анализ на определени стратегии и избор на най-подходящата. Аналогично е извършено и за слаби скали.

3.4. Вероятностен подход при оценка на коефициента на устойчивост с прилагане критериите на Mohr Coulomb, Hoek-Brown и Drucker-Prager

Оценката на устойчивостта в реалния масив се затруднява от неопределеността на използваната изходна информация. Вероятностният характер на изходните данни е заложен в самата природа на скалния масив.

Случаен характер имат и сеизмичните въздействия от пробивно взривните работи, динамичните натоварвания от действащата механизация и др. в периода на експлоатация.

Изчисленията на коефициента на устойчивост се извършват с помощта на стойностите на фактори с вероятностен характер, за които са получени статистическите им разпределения. Тук се разглежда прилагането на статистическото моделиране за оценка на устойчивото състояние на масива. Тъй като коефициентът на устойчивост представлява функция на случайни

величини и самият коефициент е случайна величина.

Вероятността скалният масив да е устойчив е

$$S=P(A \geq B) \text{ или } S = P\left(\frac{A}{B} \geq 1\right), \quad (3.5)$$

а рискът представлява допълнението до единица, т.е. $1-S$, където A и B са функции на участващите в описанието на разглеждания процес фактори и условия

Едни от най-често използваните критерии за устойчивост са тези на Hoek-Brown, Mohr - Coulomb и Drucker - Prager.

Критерий на Hoek-Brown. При този критерий границата между устойчиво и неустойчиво състояние на масива се задава с формулата

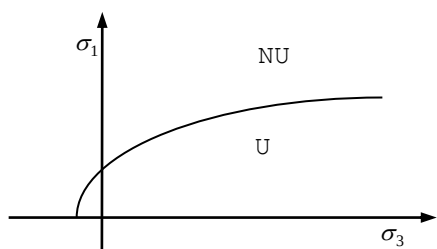
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2}, \quad (3.6)$$

където σ_1 и σ_3 са главните напрежения, m и s са материалните константи, σ_c е якостта на едноосов натиск на ненарушените скали.

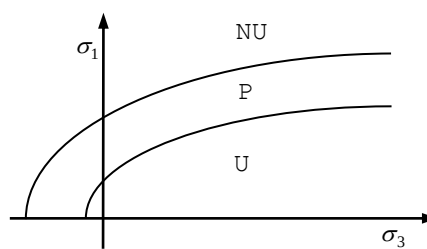
Критерий на Mohr - Coulomb. Тук зависимостта на σ_1 от σ_3 се задава с равенството

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k \cdot \sigma_3, \quad (3.7)$$

където $\sigma_{cm} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$, $k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$, φ и c са съответно ъгълът на вътрешно триене и кохезията на скалите.



Фиг. 3.2



Фиг. 3.3

Критерий на Drucker - Prager.

$$\sigma_1 = \alpha \cdot J_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (3.8)$$

където J_1 и J_2 са съответно първа и втора инварианта на тензора на напрежение, $\alpha = \frac{2 \cdot \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$, $k = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$, φ и c са съответно ъгълът на вътрешно триене и кохезията на скалите.

И в трите критерия, при определена стойност на σ_3 съобразно общия запис (3.5) величината A представлява стойността на израза, чрез който се представя σ_1 посредством σ_3 при всеки от критериите а величината B е стойността на максималното главно напрежение, което действа в масива при същата стойност на σ_3 . Следователно при критерия на Hoek-Brown величината A зависи освен от σ_3 и от m , s и σ_c , а при другите два критерия A е функция и на φ и c . Тъй като всяка една от тези променливи се описва със съответен вероятностен закон, за оценка на A най-подходящ е методът на статистическото моделиране. При него за всеки вариант на съчетаване на стойностите на посочените величини, величината A се представя геометрично

чрез една линия в равнината $O\sigma_1\sigma_3$, положението на която определя зоната на устойчивост (U) и зоната на неустойчивост (N) на масива (фиг. 3.2). Ако се извърши едно проиграване по метода Монте – Карло ще се получи едно положение на тази линия, а при многократно реализиране ще се получат множество такива линии. Съвкупността от тези линии статистически характеризира зона, която е удачно да се нарече преходна. Така вместо две зони (U и N) се получават три (фиг. 3.3) – една преходна (P) и други две – съответно на устойчиво (U) и неустойчиво (N) поведение на масива.

Съставена е компютърна програма KRITER3, с помощта на която се намира и се прави оценка на преходната зона. За да се демонстрира изложеният подход са използвани конкретни входни данни и са получени зависимости, аналогични на тези на фиг. 3.3.

При всяка стойност на σ_3 в рамките на преходната зона се получава статистическо разпределение, което дава възможност при попадане в нея загубата на устойчивост да се оцени с определена вероятност. Колкото точката е по-нагоре, т.е. σ_1 е с по-голяма стойност, вероятността да настъпи неустойчивост се увеличава и при попадане в зона N тази вероятност става равна на 1.

Този подход дава възможност да се сравнят различните критерии за устойчивост и да се избере този, който дава правдоподобно преходната зона. За да има сравнимост тези зони трябва да се получат за различните критерии при едни и същи скали.

Да обърнем внимание на това, че действащите в масива напрежения също зависят от фактори, които имат вероятностен характер и следователно не трябва да се определят с една стойност, а с вероятностните им закони. Т.е. величината B в общият запис (3.5) се характеризира също с определено статистическо разпределение, получено въз основа на проведени наблюдения. Ако всички стойности на σ_1 при фиксирана стойност на σ_3 са изцяло в зона U изводът е ясен – масивът е устойчив. Ако всички стойности принадлежат на областта N масивът е в неустойчиво състояние. Интересен е случаят, когато стойностите принадлежат „преходната” зона. Тогава се налага да се оцени вероятността S масивът да е в устойчиво състояние. При приемане на тази стратегия (масивът е в устойчиво състояние) е ясно, че рискът да не бъде така е $1-S$. С помощта на тези две числа може да се оценят щетите при евентуално сбъдване на нежеланото събитие – разрушаване на масива.

3.5. Прилагане на метода на крайните елементи, за намиране полето на напреженията и деформациите, в условията на изменчивост на свойствата на скалите

Основните фактори, влияещи на устойчивостта на минни изработки са геоложки, хидрогеоложки, физико-механични, климатични и минно технически.

Особено внимание по-нататък ще бъде обърнато на влиянието на физико-механичните свойства на скалите (якостни и деформационни) при изследване на напрегнатото и деформирано състояние на масива по метода на крайните елементи. Тези величини имат количествен характер.

Рудникът е сложна система и нейното състояние се определя от съв-

местното влияние на много фактори (величини). В математическите модели, посредством които се описва нейното състояние и в частност напрегнатото и деформирано състояние на масива, тези фактори участват с числените си стойности. На практика изследователя или този, който трябва да вземе управленско решение разполага със стойностите на тези величини, получени посредством наблюдение или подходящ експеримент. Точността на получените данни зависи от точността на апаратурата за измерване и от условията на експеримента.

При провеждане на инженерна дейност в скалния масив е необходимо да се знае поведението на скалите, особено в близост до минните изработки.

Същност на методите за оразмеряване на конструктивни елементи е изследването и определяне на степента на натоварване на целици, напрегнатото и деформирано състояние около проучвателни, подготвителни и добивни изработки. За целта се използва математическо моделиране и се прилагат съответни методи за решаване и изследване.

В съвременната инженерна наука и практика широко приложение намират методите, използващи апарата на теорията на еластичността, в която решаването на пространствената задача се свежда до определяне на компонентите на преместванията $u(u_x, u_y, u_z)$, на напреженията $\sigma(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy})$ и на деформациите $\varepsilon(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy})$ във всяка точка на разглежданото тяло.

Решението на задачата обикновено се търси числено, т.е. с така наречените преки методи, R. Courant, D. Hilbert [16], F.C. Zienkiewicz [24].

При метода на крайните елементи се достига до решаване на система линейни уравнения, която в матричен вид може да се запише така

$$[K]\{u\} = \{F\},$$

където $\{u\}$ са преместванията, $[K]$ е матрицата на коравината, а $\{F\}$ са сумарните външни и вътрешни сили, които действат във всеки възел от мрежата на дискретизация на изследваното тяло.

Но свойствата на скалите не са детерминирани, а имат ясно изразена вероятностна природа. Значителното изменение на якостта на скалите често е свързана с механични процеси, водещи до концентрация на напреженията в отделни участъци на масива, което довежда или до уплътняване и повишаване на якостта на минералните агрегати, или в условия на пренатоварване, води до нарушаване на действащите в тях връзки и понижаване на якостта под определена граница, при което настъпва пълно разрушаване. Освен механичните процеси на якостта влияят топлинни, хидравлични, химични процеси и др.

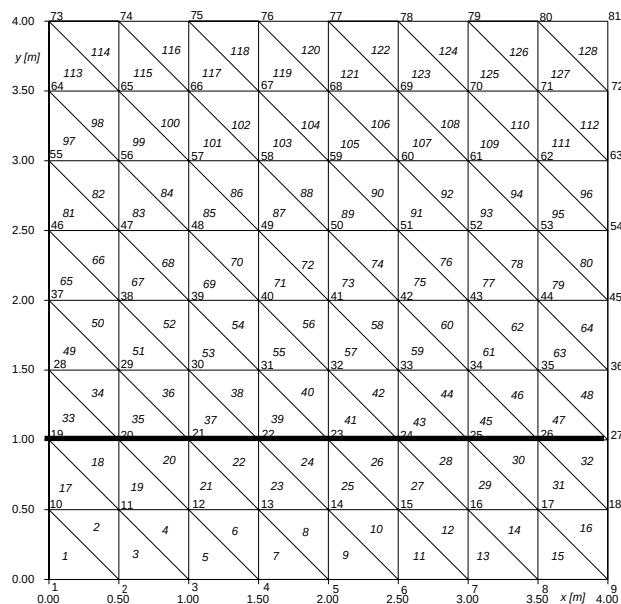
Щом свойствата на скалите имат вероятностен характер, то тогава преместванията, напреженията и деформациите са също случайни величини.

Научно обосновани методи за анализ на случайни величини са разработени в теория на вероятностите, математическата статистика и други математически дисциплини. Да се търси аналитично решение на проблема е нецелесъобразно, а в много случаи и невъзможно. Тук е избран методът на статистическото моделиране (Метод Монте Карло). Той става достъпен посредством съвременните компютри и благодарение на идеите за получаване на случайни числа с желан вероятностен закон на разпределение.

Чрез многократно изпълнение на детерминираната форма на метода на крайните елементи се получават преместванията, напреженията и деформациите в определени възли. Целта е чрез тях да се намерят оценки на определени числени характеристики на тези величини.

С помощта на предложеният модел са решени примерни задачи, включително такива, за които има и аналитично решение. За целта като основен изчислителен модул е използвана собствената програмна система FIELEM.

За примера наречен „гредостена“ (фиг. 3.4) се приема, че плътността ρ е константа, а само модула на Юнг E и коефициента на Поасон μ са случайни величини. Съвкупността от двете съставляващи (E, μ) представлява двумерна случайна величина. Предполага се, че в резултат на извършени наблюдения (лабораторни изпитания) е известна извадка с обем n за двумерната случайна величина (E, μ) . Съставено е нейното интервално статистическо разпределение, което представлява двумерна таблица от числа. Това всъщност е съвместното разпределение на (E, μ) . По-долу стойностите на E са означени с x , а тези на μ - с y . С $F(x, y)$ е означена съвместната функция на разпределение на (E, μ) , $F_E(x)$ е функцията на разпределение на E , $F_{\mu E}(y|x)$ е функцията на разпределение на μ при условие E .



Фиг. 3.4. Схема на дискретизация за примера „гредостена“

Съгласно формулата

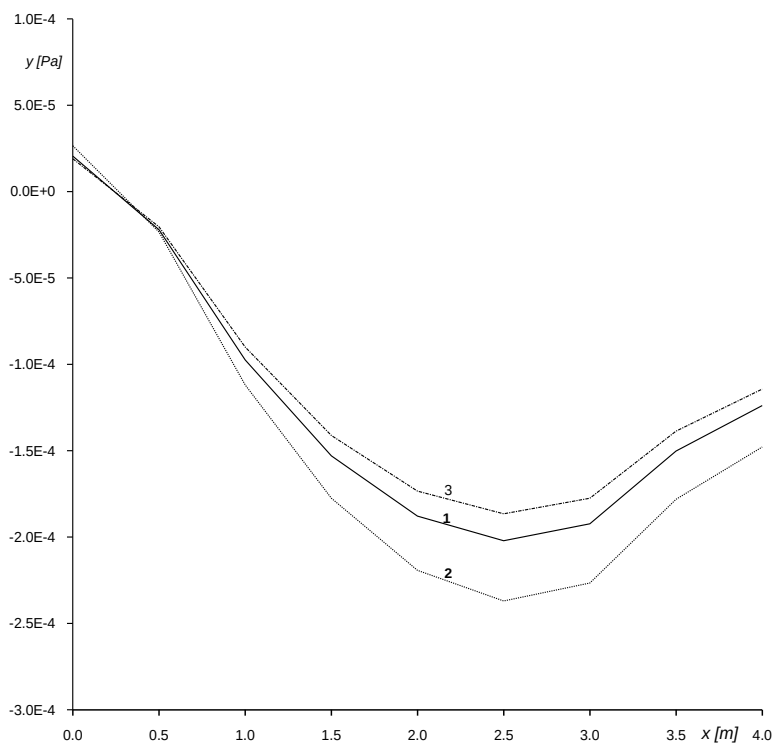
$$F(x, y) = F_E(x) \cdot F_{\mu E}(y|x)$$

може да получим последователно имитирането на величината (E, μ) , посредством произволна двойка η_1, η_2 независими, равномерно разпределени в интервала $[0; 1)$ случайни числа. За целта се използват обратните функции на $F_E(x)$ и $F_{\mu E}(y|x)$ в следната последователност. Посредством намереното число η_1 и обратната функция $F_E^{-1}(x)$ се намира стойността $x^* = F_E^{-1}(\eta_1)$. От x^* се вижда коя е съответната условна функция на разпределение $F_{\mu E}(y|x^*)$. С помощта на нея, чрез намереното число η_2 и обратната функция $F_{\mu E}^{-1}$ се

определя реализацията y^* на процеса при втората стъпка по формулата $y^* = F_{\mu E}^{-1}(\eta_2 | x^*)$. С това е извършена една имитация на величината (E, μ) .

Този процес се изпълнява многократно, за да се получат достатъчно на брой такива реализации, като при всяка от тях чрез намерените премествания се получават напреженията и деформациите в определени възли. Целта е чрез тях да се намерят оценки на определени характеристики (най-често на математическото очакване) на случайните величини $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}^T$ и $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}^T$.

В разглежданият пример за онагледяване са използвани (фигура 3.5) получените стойности за напреженията σ_y , взети по сечение „19-27”, свързващо възлите на дискретизация с номера 19 и 27.



Фиг. 3.5. Напрежения σ_y по сечение „19-27”

Извършените реализации на модела дават основание да твърдим, че той с успех може да се разглежда като надстройка на традиционното приложение на метода на крайните елементи. Аналогичен подход е възможно да се използва и при прилагане на други методи за изследване на напрегнатото и деформирано състояние на скалния масив.

ГЛАВА 4. АЛГОРИТМИ И ПРОГРАМИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ НА СТАТИСТИЧЕСКОТО МОДЕЛИРАНЕ ПРИ РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧИ ОТ ДОБИВА НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ

В тази глава са описани алгоритми и са дадени пълните текстове на повечето от създадените програми, с помощта на които е реализирано статистическото моделиране и са решени задачите, включени в глави 2 и 3. Изготвянето на програмите позволи не само да се решат поставените задачи, а и да се постигне по-голяма самостоятелност и мобилност. Също така при възникнала необходимост всякога има възможност да се внасят допълнения и подобрения, което довежда до

разширяване на приложимостта им. Много от посочените предимства не са достъпни при работа с програмни продукти, които не са собствени.

Програмите, включени към тази глава са:

4.1. SONDA; тази програма извиква подпрограми CHISLA и SXETMK;

Посредством програмата се прогнозира производителността на сонда.

4.2. SAFETYG4; програмата извиква подпрограми Order, Ordfr, Comula, Stopri; OTKOS4;

Програмата е предназначена за анализ на значението на риска при изследване устойчивостта на откоси в многослойна среда.

4.3. SAFETYDDN, SAFETYSDN; програмата извиква подпрограми Order, Ordfr, Comula, Stopri; OTKOS15;

Чрез тези програми се получава вероятността за устойчивост на откоси в строителни изкопи с отчитане на динамичните натоварвания;

4.4. VARIAR2; програмата извиква подпрограми Order, Ordfr, Comula, Stopri; OTKOS20, Sdopa, Sdobo, Srear, Disper;

С програмата се определя вероятността за устойчивост при изграждане на насипища.

4.5. OPTFRONT; програмата извиква подпрограма ATANM]

С помощта на този изчислителен модул се определя оптималната посока на работния фронт при добив на скални облицовъчни материали с отчитане вероятностния характер на напукаността.

4.6. METSLUT; програмата извиква подпрограма OTKOS4;

Използва се за намиране екстремалните стойности на коефициента на устойчивост по метода на случайното търсене;

4.7. Програми, посредством които се реализира вероятностният подход при определяне на Q, RMR, N', като основа за оценка на риска.

4.7.1. QFACTMMK; програмата изисква следните подпрограми Order, Ordfr, Comula, Stopri.

С нея се реализира вероятностният подход за определяне на класификационната характеристика Q

4.7.2. RMRMMK; програмата изисква следните подпрограми Order, Ordfr, Comula, Stopri.

Посредством тази програма се реализира вероятностният подход за определяне на класификационната характеристика RMR

4.7.3. NPRIMMK; програмата изисква следните подпрограми Order, Ordfr, Comula, Stopri.

Чрез нея се реализира вероятностният подход за определяне на показателя N'.

4.8. KRITER3; програмата изисква следните подпрограми Order, Ordfr, Comula, Stopri.

Чрез програмата се реализира вероятностният подход при оценка на коефициента на устойчивост с прилагане критериите на Mohr Coulomb, Hoek-Brown и Drucker-Prager

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ И ПРИНОСИ

Процесите и явленията в природата, свойствата на природната среда, много от техническите, технологичните, икономическите, екологичните, социологическите и др. фактори имат вероятностен характер. От тук произтича необходимостта чрез наблюдение и лабораторни опити да се натрупва за тези фактори достатъчно информация, която достоверно да ги представлява. По-пълното използване на тези данни в съответни модели ще даде възможност по-добре да опишем, анализираме и оценим протичащи природни процеси и явления, или такива свързани с човешка дейност. Всички тези изисквания удовлетворяват статистическите модели. Прилагането им в областта на открития и подземен добив на полезни изкопаеми ще доведе до повишаване на сигурността на работа на хора и съоръжения, рационално и ефективно изземване на земните богатства и т. н. Именно създаването на статистически модели ще позволи да се решат много от възникващите проблеми, тъй като при тях по подходящ начин се отчита вероятностния характер на участващите фактори, от които зависи моделираният природен феномен, производствен процес и т. н.

Авторът се надява представената разработка, с развитите в нея идеи, да послужи като методическо начало на други възможни приложения на статистическото моделиране и изобщо на вероятностното моделиране.

ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ И ПРИНОСИ

С представения научно-изследователски и образователен труд са постигнати редица резултати, въз основа на които са предявени и съответни авторски претенции за научни приноси.

А). ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ

1. Постигнат е напълно приемлив (от гледна точка на потребностите на практиката на открития и подземен добив) пренос на известни математически методи за решаване на конкретни проблеми от практиката на открития и подземния добив чрез прилагане на методите на статистическо моделиране и компютърно програмиране.

2. Доказана и разширена е приложимостта на имитационното моделиране за вземане на рационални управленски решения, в конкретни области на открития и подземния добив на полезни изкопаеми

3. В областта на открития добив са създадени и изследвани статистически модели за:

- Определяне на вероятността за устойчивост при изграждане на насипища;
- Построяване и изследване на модел за изчисляване на устойчивостта при многослойни насипи и масиви;
- Намиране на вероятността за устойчивост на откоси и технологични възможности за въздействие;
- Получаване на вероятността за устойчивост на откоси в строителни изкопи;
- Определяне на риска при работа на роторни багери в условията на свлачищни деформации и свлачища в открити рудници;
- Намиране и изследване на значението на риска при отчитане на устойчивостта на откоси в многослойна среда;
- Определяне посоката на работния фронт при добив на скални облицовъчни материали с отчитане вероятностния характер на напукаността;
- Прогнозиране на производителността на сонда посредством имитационно моделиране;
- Намиране на екстремалните стойности на коефициента на устойчивост по метода на случайното търсене.

4. В областта на подземния добив са създадени и изследвани статистически модели за:

- Определяне на класификационните характеристики на скалния масив;
- Определяне на Q , RMR , N' , като основа за оценка на риска;
- Оценка на коефициента на устойчивост с прилагане критериите на Mohr Coulomb, Hoek-Brown и Drucker-Prager;
- Прилагане на метода на крайните елементи, за намиране полето на напреженията и деформациите, в условията на изменчивост на свойствата на скалите.

Б). АВТОРСКИ ПРЕТЕНЦИИ ЗА ПРИНОСИ

Въз основа на изброените разработки могат да се формулират следните авторски претенции за приноси:

Първо: В категорията: „... научни приноси с доказване чрез нови средства на съществени нови страни на вече известни и/или съществуващи проблеми...” авторът има една единствена претенция: **Пренос на математически методи за формализация, изследване, анализ и оптимизиране при решаване на задачи от добива на полезни изкопаеми. Тези методи, създадени по повод и за свършено други условия, позволяват в математическа среда да се опише изменението на технологични показатели и параметри на основни проблеми в открития добив. Това позволява оптимизирането им чрез адекватни на тяхната същност алгоритми.**

Към тази авторска претенция се отнася преноса за условията на проблемите в открития и подземен добив с прилагане на статистическото моделиране, създаване на алгоритми и съответно собствено програмно осигуряване за решаване на редица задачи.

Използваните методи са намерили приложение в най-различни области, но за първи път у нас са приложени целево към решаване на основни проблеми на открития и подземен добив със собствени алгоритми и програмно осигуряване.

Второ: В следващата по значимост категория: „...научно-приложни приноси с решаване с нови средства на известни проблеми или допълване с нови знания на известни проблеми...” се отнасят преноса, адаптирането, създаването на алгоритми и оригинални програми, позволили решаването на редица важни за практиката проблеми:

- Определяне на вероятността за устойчивост и риск от свличане при изграждане на многослойни насипи и при изследване на многослойни масиви;
- Получаване на вероятността за устойчивост на откоси в строителни изкопи, в условията на свлачищни деформации и свлачища в открити рудници;
- Намиране на екстремалните стойности на коефициента на устойчивост по метода на случайното търсене.
- Определяне посоката на работния фронт при добив на скални облицовъчни материали с отчитане вероятностния характер на напукаността;
- Вероятностно определяне на класификационните характеристики на скалния масив Q , RMR , N' и оценка на риска;
- Оценка на коефициента на устойчивост с прилагане критериите на Mohr Coulomb, Hoek-Brown и Drucker-Prager;
- Прилагане на метода на крайните елементи, за намиране полето на напреженията и деформациите, в условията на изменчивост на свойствата на скалите

Трето: В най-нископоставената категория, но съдържаща в себе си най-големия възможен потенциал за внедряване и наречен „...приложни приноси...” се отнасят всички получени резултати при решаване на задачите:

- Определяне на вероятността за устойчивост при изграждане на насипища;
- Построяване и изследване на модел за изчисляване на устойчивостта при многослойни насипи и масиви;
- Намиране на вероятността за устойчивост на откоси и технологични възможности за въздействие;
- Получаване на вероятността за устойчивост на откоси в строителни изкопи;
- Определяне на риска при работа на роторни багери в условията на свлачищни деформации и свлачища в открити рудници;
- Намиране и изследване на значението на риска при отчитане на устойчивостта на откоси в многослойна среда;
- Определяне посоката на работния фронт при добив на скални облицовъчни материали с отчитане вероятностния характер на напукаността;
- Оценка на производителността на сонда;
- Намиране на екстремалните стойности на коефициента на устойчивост по метода на случайното търсене.
- Определяне на Q , RMR , N' , като основа за оценка на риска;
- Оценка на коефициента на устойчивост с прилагане критериите на Mohr Coulomb, Hoek-Brown и Drucker-Prager;
- Прилагане на метода на крайните елементи, за намиране полето на напреженията и деформациите, в условията на изменчивост на свойствата на скалите.

ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- A1. Златанов, П., М. Маждраков, Г. Трапов, Влияние на възможните отклонения в стойностите на физико-механичните показатели на литоложките разновидности върху устойчивостта на работните бордове в Източномаришките рудници. Минно дело, 12, 4-6 с., 1985.
- A2. Михайлов Г., Г. Трапов. Вероятностен подход за анализ и оценка на някои природни и технически фактори и тяхното влияние върху степента на риска при избора на оптимално решение за добивна технология, Годишник на Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски", том 44-45 II, стр. 23-25, София, 2002.
- A3. Трапов Г., Г. Михайлов. Фактори, влияещи върху коефициента на устойчивост при оразмеряване на открити добивни пространства в подземния рудодобив. Международна конференция "Съвременни геомеханични методи в минната промишленост и подземното гражданско и тунелно строителство". Сборник доклади, стр. 269-274, Несебър, България, 9-13 юни 2003.
- A4. Трапов Г., Г. Михайлов. Прилагане метода на крайните елементи в условията на изменчивост на свойствата на скалите. Годишник на Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", свитък II, стр. 85 - 89, София, 19 – 20 октомври 2009.
- A5. Трапов, Г., П. Златанов. Оптимизиране устойчивостта на откос по метода на случайното търсене. Годишник на Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", свитък II, стр. 91 - 94, София, 19 – 20 октомври 2009.
- A6. Zlatanov, P., P. Stoeva, R. Kachikova, G. Trapov. Modele de computer d'estimation du risque pendant la construction des dépôts non productifs, Colloque les risques en Génie Civil. Tunisie, pp.258-261, 18/19 mars 2004.
- A7. Zlatanov, P., P. Stoeva, G. Trapov. Technological risk at big excavators operation at land sliding deformations and landslides in open-pits. Seventh international conference on marine science and technology, v. 2, Varna, Bulgaria, pp.53-55, October 7 – 9, 2004.

ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ

1. Газиев, Э.Г., В.И. Речицкий. Учет точности исходной информации при анализе устойчивости скальных откосов, Труды Гидропроекта, 68, 65-79 с., 1970.
2. Георгиев, Г., Ш. Христов. Изчислителни схеми за оразмеряване на откосите в откритите рудници от басейна на Марица Изток. Доклади на националната конференция по открит добив, том 1, Варна, 1971.
3. Ильницкая, Е.И. и др. Свойства горным пород и методы их определения. Под ред. д. т. н. Протодяконов, М., Недра, 392 с., 1969.
4. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геология. Л., Недра. 528 с., 1970.
5. Михайлов, Г.А. Научни изследвания върху възможностите за прилагане на едностадийни и многостадийни добивни технологии при подземно разработване на рудни находища. Хабилизационен труд за получаване на научното звание "професор". София, 2007.
6. Низгуредкий, З.Д. Учет неоднородностей при формировании статистических функций распределения геологических показателей. В сб. Маркшайд.дело, вып.1, Л., 135 с., 1974.
7. Половов Б.Д. Решение задач устойчивости откосов в условиях риска. Изв.ВУЗ, Горн. журнал, 4, 30-33 с., 1981.
8. Соболев, И. М. Метод Монте Карло. М., Наука, 1972.
9. Стоянов, Д.Ст. Ръководство за упражнения по технология на открития добив, С., 1996.
10. Трендафилов, Ст. и др. Определяне на широчината на предпазните площадки в ненарушен и свлачищен масив в зависимост от динамичните натоварвания. Научен отчет на МГУ. София, 1991.
11. Фисенко, Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., Недра, 378 с., 1965.
12. Чини, Р.Ф. Статистические методы в геологии. М., Мир, 189 с., 1986.
13. Alonso, E. Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays. Géotechnique, 26,3, pp.453-472, 1976.
14. Barton, N.R., Lien R. and Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech., 6(4), pp.189-236, 1974
15. Bieniawski, Z.T. Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. African Instn. Civ. Engrs., Vol 15, No 12, Dec. 1973, pp.335 – 344, 1973.
16. Courant, R., Hilbert D. Methods of Mathematical Physics. – Berlin: Springer Verl., 1924.
(Руски превод: Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики.- М. – Л.: Гостехиздат, 1951).
17. Dhillon, B.S., Sing Chanan. Engineering reliability. New Techniques and Applications. New York, 1981.
18. Forster, W., E. Weber. Факторы. влияющие на вероятность разрушения породных откосов.
19. Hoek, E., P.K. Kaiser, W.F. Bawden. Support of Underground Excavations in Hard Rock. A.A.Balkema /Rotterdam /Brookfield/, p.216,1995.
20. Hutchinson, D. J., Diederichs, M.S. Cablebolting in Underground Mines. Published by Bi Tede Publishers Ltd, Richmond, British Columbia, Canada, 1996.
21. Metropolis, N., Ulam S. The Monte Carlo method. J. Amer.statistical assoc.,44, № 247,

pp.335-341, 1949.

22. Naylor, Thomas H., Computer simulation experiments with models of economic systems. New York, 1971.
23. Todorova, M., P. Stoeva. Estimation de mecanisme de deformation des pentes dans un milieu de polycouches et changement des matériaux du terrie. Rapport scientifique de Mariza Est, (bul), 205 p., 1970.
24. Zienkiewicz, O. C. The finite element method in engineering science. McGraw-Hill, 521pp., 1971