

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН
РИЛСКИ"**

Мариана Трифонова Драганова

**ПРИЛОЖИМОСТ НА КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ ЗА
ПРОГНОЗИРАНЕ И ТЕХНОЛОГИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА
УСТОЙЧИВОСТТА НА ОТКОСИ В ОТКРИТИ РУДНИЦИ
(на примера на откритите рудници в мини „Марица-Изток”)**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за присъждане на образователна и научна степен “Доктор”

Научна специалност: 02.08.04 „Открит и подводен добив на полезни изкопаеми”

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

Научни консултанти:

доц. д-р Евгения Александрова

доц. д-р Георги Трапов

София, 2013г.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Увод

Рудниците представляват сложни високо механизирани технически системи. Нарушаването на равновесното състояние на работните стъпала довежда до частична или пълна неработоспособност на тези системи.

Въпросът за устойчивостта на работните стъпала възниква през всички етапи на разработване на дадено находище, особено през периода на експлоатацията му. Решаването на този въпрос зависи от много фактори и условия, които могат да бъдат обособени в три основни групи – природни, минно-технически и организационни. Характерно за тези групи фактори е, че информацията която предоставят за целите на проектирането, строителството и експлоатацията, се намира под влияние на голям брой първични, слабо контролируеми и влизащи в сложни взаимовръзки причини и носи случаен характер. Самите методи, чрез които се обработват получените по експериментален път величини, са източник на различни грешки, също случайни.

Ето защо е необходимо да се прилагат методи, отчитащи случайния характер на величините, от които зависи коефициента на устойчивост.

Един такъв метод е Методът Монте-Карло.

Цели и задачи на дисертационния труд

Целта на представения дисертационен труд е:

Прилагане на компютърно моделиране за прогнозиране и технологично управление на устойчивостта на откоси в открити рудници. По-конкретно - създаване на модели и разработване на програмно осигуряване за реализацията им, предназначени за оценка устойчивостта на откоси на работни стъпала, формирани в еднороден и/или многослоен масив, с отчитане на вероятностния характер на изменение на физичните свойства и якостните показатели на литоложките разновидности, височината на работното стъпало и ъгъла на откоса, както и пресмятане на риска от свличане.

Примерите в разработката са за условията на откритите рудници в мини „Марица-изток”.

За постигане на поставената цел са решени следните основни задачи:

1. Изследване на влиянието на изменението на физичните свойства и якостните показатели на масива върху устойчивостта на работно стъпало.
2. Изследване влиянието на изменението на стойностите на технологичните параметри върху устойчивостта на работното стъпало.
3. Създаване на вероятностен модел и съответна методика за оценка на надеждността на работно стъпало.
4. Създаване на софтуерни модули за решаване на специфични задачи от компютърното моделиране и компютърната графика, предназначени за осигуряване на дейностите по оценка и управление устойчивото състояние на откоси в открити рудници.
5. Сравнителен анализ на разработените софтуерни модули със съществуващи програмни системи.

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

Структура и обем на работата

Дисертацията включва увод, четири глави, заключение, основни резултати и приноси, две приложения и списък с използваните литературни източници в рамките на 113 страници, включително 50 фигури, 11 таблици и 2 приложения.

В Глава 1 е направен литературен обзор по темата на дисертацията, като се акцентира върху литературни източници, в които по определен начин се отчита вероятностният характер на физико-механичните показатели на литоложките разновидности и технологичните параметри на откоса.

В Глава 2 чрез факторно-диапазонния анализ е показано влиянието на физико-механичните показатели на литоложките разновидности и технологичните параметри върху устойчивостта на работно стъпало.

В Глава 3 са създадени и изследвани вероятностни модели за оценка устойчивостта на:

- еднородно стъпало при съвместното изменение на физичните свойства, якостните показатели и технологичните параметри;
- открито стъпало в случай на система от пукнатини, формиращи хлъзгателната повърхнина;
- нееднородно стъпало при произволно зададена хлъзгателна повърхнина и при хлъзгателна повърхнина, зададена с определен аналитичен израз;
- откритни стъпала с отчитане влиянието на динамични въздействия.

Глава 4 съдържа описание на разработеното от автора на настоящия дисертационен труд програмно осигуряване и сравнителен анализ с готови системи в тази област.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1. Въведение в проблема. Цели и задачи на дисертацията

1.1. Актуалност

Проблемът за устойчивостта на откосите на стъпалата в откритите рудници на Източномаришкия басейн възниква след появата на първите свлачища в началния период на строителството на рудник „Трояново-1”.

В резултат на задълбочени изследвания на отделни научни работници и интегрирани колективи [1, 2 и много други] за периода от появяването на първото свлачище до момента, стана възможно да се изяснят:

- въпросите, свързани с условията на възникване на деформации по стъпалата и бордовете;
- приблизителната схема на деформиране;
- сравнително достоверни стойности на физико-механичните показатели на литоложките разновидности, изграждащи масива;
- методиката за оценка на устойчивостта на бордовете и оразмеряване на същите [9] и т.н.

Значителният интервал на вариране на стойностите на физико-механичните показатели на литоложките разновидности и геомеханичните елементи от конфигурацията на борда, както и различните взаимни съчетания между тях, обуславят съществуването на някакво “размито” множество от стойности на коефициента на устойчивост. При това положение, интерпретирането на коефициента на устойчивост, при сегашния начин на изследване като константна величина се счита за нецелесъобразно. Да се установи изменението на същия в известна област, носи значително по-голяма информация по отношение на възможността за вземане на решения и отговаря на действителния характер на състоянието на изследваната система. Това от своя страна изисква да се определи достоверността на получената числена стойност за коефициента на устойчивост при наличната информация за конкретните минно-геоложки и минно-технически условия. С

прилаганите детерминирани методи такава оценка е невъзможно да бъде направена, което налага използването на нови математически методи на моделиране на природната среда и техническият обект и съответни начини за обработка на получените при моделирането резултати.

1.2. Вероятностен характер на изходната информация за природната среда

Както посочва Ю. Н. Малюшицкий [11] “при определяне на различни физико-механични показатели, даже за еднородни скали, намиращи се при еднакви условия, количествените стойности на показателите, получени при отделни опити, неизбежно варират в известни граници...”.

В същия смисъл е и казаното в [12], че “... доколкото съществуват голям брой трудни за отчитане фактори, определящи якостта на скалите, параметрите на якостта могат да се определят само приблизително ...”.

Големината на съпротивлението на срязване има сложна природа и зависи [10] от минералния и зърнометричния състав, структурата, текстурата, характера на взаимодействие между отделните компоненти на състава, плътност, влажност, водонепропускливост, наличие на дефекти и елементи на отслабване, състава на циментиращото вещество, състав на обменните катиони, ход на естествено историческото формиране на скалите, условията на провеждане на експеримента – големина, скорост на изменение на натоварването и продължителност на действието му, от въздействието на човека и други.

Затова при определянето на стойностите на физико-механичните показатели на масива в [13] се отбелязва “... Скалите имат голяма нееднородност на свойствата и характеристиките си, представлявайки стохастична среда. Затова възниква необходимостта основните физико-механични показатели 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. ...”. Във връзка с извършването на стабилитетни изчисления пак в [13] се казва, че “...някои изходни физико-механични свойства на скалите се разглеждат като постоянни величини. В повечето случаи тези стойности варират в доста широки граници и напълно могат да се описват само с разпределения с техните средни, дисперсия и коефициент на вариация. Крайният резултат на такива задачи, представлява също случайна величина, която се изменя в свои граници в зависимост от границите на изменението на влизащите в изчисленията изходни физико-механични характеристики ...”.

Като използва основните положения от теорията на грешките, П. Л. Клемяционок [15] посочва набор от по-съществени причини за допускане на систематични грешки:

По тези причини оценката на физико-механичните свойства на литоложките разновидности, която се явява като случайна величина, не се прави на основата на единични изследвания.

За получаване на надеждни и достоверни характеристики на глините трябва да се извършват многобройни изследвания на техните свойства в лабораторни и полеви условия. Като се елиминира грешката от методиката на изследване и използваната апаратура, сравнително достоверна стойност за якостните показатели може да се получи, чрез статистическо осредняване на данните. Да се знае средната стойност, още не означава, че се познава случайната величина. Необходимо е да се знае още диапазона на изменение и вероятността на появяване на различните ѝ стойности, както и появата на стойността ѝ в определен интервал.

1.3. Особенности на коефициента на устойчивост като характеристика на състоянието на стъпалата в откритите рудници

При стабилитетните изчисления като критерий за оценка на състоянието на минните изработки се въвежда коефициентът на устойчивост.

В него участват плътността и якостните свойства (ъгъл на вътрешно триене и кохезия) на литоложките разновидности на масива, ъгъл и височина на откоса на стъпалата. В много модели, които се използват за определяне на устойчивостта на откоса, за физичните свойства и якостните характеристики на масива като цяло се приемат средни стойности (обикновено средноаритметичната или средно претеглената) [13].

Използването на осреднените характеристики за физико-механичните показатели на литоложките разновидности, “претопява” тяхната изменчивост. Детерминираният подход за получаване на коефициента на устойчивост заменя множеството от функционалните му стойности с една единствена конкретна стойност, която не дава информация за природната и технологична изменчивост, а служи като моментна оценка на състоянието. Като се има предвид, че и приетата изчислителна схема на деформационния процес не отчита всички силови взаимодействия, става ясно, че така определената единична („частна“) стойност на коефициента на устойчивост попада под силното влияние на ограничената и неточна изходна информация. Разсейване на характеристиките на природната среда и неточността при определянето на геометричните параметри (дължина на плъзгателната повърхнина, мощности на литоложките разновидности, широчини на работните хоризонти и др.) ще доведе до разсейване в стойностите на силовите компоненти, участващи в равенството за коефициента на устойчивост, а от там и до разсейване и в стойностите на самия коефициент на устойчивост. В този случай вече може да се говори за вероятност от настъпване на дадено събитие (например устойчивост на стъпалото или неустойчивост), което е свързано с преминаване от детерминиран към стохастичен подход.

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

- не се отчита вероятностния характер на използваната входна информация и получавания краен резултат;
- не може да се даде количествена оценка за устойчивостта на откосите на стъпалата, както в даден момент, така и за определен период от време.

1. 4. Съвременно състояние на въпроса за приложението на вероятностен подход по отношение устойчивостта на откосите

За необходимостта от използване на вероятностни методи и модели в механиката на скалите се казва [19] „... Големият брой параметри, неопределеността на техните числени стойности и изменчивостта им в пространството и времето, довеждат до необходимостта от вероятностно определяне границите на надеждността. Инженерите ... нямат друг изход, освен параметричен анализ на проблемите, с цел определяне на най-значимите параметри, които изискват щателно измерване. Този параметричен анализ трябва да се базира на вероятностни модели ...”.

Вероятностните методи и модели са удобни предимно като средство за изследване и прогнозиране [20], а не за извършване на текущи инженерни изчисления.

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

Устойчивостта на откосите на бордовете в откритите рудници от редица автори се разглежда от различни позиции. Обединяващото звено е вероятностния подход на изследване. Много от авторите приемат за методологическа основа при решаване на задачи, свързани с устойчивостта на рудничните откоси, нормален закон на разпределение на случайния аргумент. С това се постига лесно определяне на математическото очакване и средноквадратичното отклонение на разглежданите случайни величини, които се приемат че са независими (некорелирани). Коефициентът на устойчивост се дава с неговото математическо очакване, след заместване в аналитичния му израз на стойностите

на случайните аргументи с техните математически очаквания и използвайки съответните дисперсии. По наше мнение този подход е принципно неточен, тъй като функционалната стойност от средните на аргументите, в общия случай, е различна от средната стойност на функцията.

Особен интерес представляват трудовете на съветския учен Э. Г. Газиев [37, 38, 39, 40, 41], който използва в своите изследвания основно методи, базиращи се на теорията на вероятностите и математическата статистика. По негови думи, основното достоинство на вероятностния анализ се състои не само във възможността за оценка на надеждността на дадено съоръжение, но и в това, че се открива възможност за осъществяване на параметричен анализ, позволяващ да се определят най-важните фактори или параметри, на които следва да се обърне особено внимание.

Газиев посочва причините, които водят до необходимост от използване на някои приложения от теорията на вероятностите. Предполага се, че якостните показатели на повърхнините на отслабване са случайни величини, поради невъзможността да се определят точните им стойности. Същото се отнася и за останалите величини, влизащи в изчислителния модел. Приема се, че всички случайни величини имат нормален закон на разпределение. В резултат на такъв подход, коефициентът на устойчивост също се явява случайна величина.

За първи път в нашата минна практика Ив. Косеков [48] (1974г.) прилага вероятностен подход за оценка на устойчивостта на насипищен откос при постоянна височина в зависимост от изменението на ъгъла му. Използва се геометрична вероятност за намиране на закона на разпределение на ъгъла на откоса при различни височини на насипищното стъпало.

П. Златанов и други [49] посочват някои от най-важните причини, които определят случайния характер на величините, влизащи в основното равенство за устойчивостта на откосите на бордовете и насипищата в откритите рудници от Източномаришкия басейн - естествената природна изменчивост на средата, несъвършенството на методите на полеви и лабораторни изследвания, вмешателството на субективния фактор и др.

Ст. Христов [50] определя абсолютната грешка при изчисляването на коефициента на устойчивост за бордове, които биха се свлекли по кръговоцилиндрична повърхнина.

На приложението на вероятностно-статистическия подход при оценка на устойчивостта на откосите са посветени трудовете на Р. Халачев [53, 54]. Приема се допускането, че коефициента на устойчивост като случайна величина има нормално разпределение. Същият се представя като линейна комбинация на среднопретеглените якостни показатели, т.е. използва се важното свойство на нормалното разпределение – линейност. По определените стойности на математическото очакване и средноквадратичното отклонение на коефициента на устойчивост се намира вероятността за свличане на откоса.

Използването на вероятностния подход за изследване на различни процеси и обекти, включително и коефициента на устойчивост, може да се намери и в трудовете на П. Златанов, Г. Трапов, П. Стоева, Ат. Смилянов и М. Маждраков [57, 58, 59, 60].

От прегледа на достъпната литература, засягаща въпроси относно приложението на теорията на вероятностите и математическата статистика за решаване на задачи от геомеханиката, могат да бъдат направени следните по-важни изводи:

1. Сложните природни, минно-технически и икономически условия, при които се разработват откритите рудници са накарали много автори да насочат усилията си към математически методи и модели (преди всичко вероятностни), отчитащи по-адекватно същността на явленията. Съществуващите разработки имат различно ниво на приложимост и ефективност.
2. Голям брой автори твърдят, че е нецелесъобразно да се работи с детерминирани стойности на физико-механичните показатели, но липсват указания за конкретна реализация на този принцип. Най-често той се прилага под формата на оценки за

математическото очакване и дисперсията на дадена случайна величина, а при зависими величини се отчита и коефициентът на корелация.

3. Всички варианти на методи за вероятностна оценка на равновесното състояние на откосите предполагат наличието на кръговоцилиндрична повърхнина на плъзгане и еднороден масив. Епизодични са случаите на откоси с по-сложен строеж.
4. В изградените вероятностни модели се отчита стохастичният характер на ограничен брой показатели, характеризиращи природната среда. Липсват сведения относно включване в стохастичния модел на технологични елементи.
5. В повечето от разгледаните разработки използваните случайни величини се приемат за разпределени по нормален закон. Същото се счита като методологическа основа на изследванията. Възприемането на такъв подход е лесно обяснимо с факта, че всички зависимости, свързани със закона на Гаус са отдавна много добре разработени, лесно се прилагат и са табулирани. Обикновено се пропуска един недостатък на това разпределение. При него случайната величина приема стойности в интервала $[-\infty; \infty]$. Докато при повечето реално срещащи се случайни величини стойностите им са ограничени, при това са почти винаги по-големи от нула.

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

Глава 2. Изследване влиянието на основните природни и технологични фактори върху устойчивостта на работни стъпала в открити рудници

2.1. Моделирането като средство за изследване

Основно положение при изучаването на произволен процес е математическото му описание, т.е. построяването на математическия модел.

Коефициентът на устойчивост е функция на n променливи величини, със следния най-общ вид;

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

и за всяка определена наредена n -торка реални числа, за него се получава по една определена стойност. Като се вземат различни точки от n -мерното Евклидово пространство се получават различни стойности на функцията η . Те образуват множеството от функционални стойности, по разпределението на които може да се съди за поведението на случайната величина η . Преди да се пристъпи към изследването на тази функция, е необходимо да се установи влиянието върху нея на всеки елемент от горепосочените подмножества. Това ще даде възможност да се определят параметрите, които би трябвало да бъдат включени в един модел за устойчивостта, който да се изгради на вероятността основа.

2.2. Изследване влиянието в изменението на стойностите на физико-механичните показатели на литоложките разновидности върху устойчивостта на работните стъпала в рудник "Трояново-север"

Числените характеристики на параметрите, които оказват влияние върху устойчивостта, се получават главно по експериментален път (за елементите на природната среда). По тази причина, получените оценки се различават от действителните стойности на параметрите. Този факт се обуславя от грешки при експериментирането и влиянието на различни случайни смущения. Те от своя страна определят основните физико-механични свойства на глините като функция на много променливи с широк диапазон на изменение.

Независимо от произхода им, допуснатите грешки се отразяват по различен начин върху получаваните крайни резултати от изчисленията в случая за коефициента на устойчивост.

За простота при изследването, ще отхвърлим съществуването на грешка при апроксимирането на реалния деформационен процес в ще изследваме само ръста на евентуалната грешка в изходните данни за физико-механичните показатели на литоложките разновидности.

Варирането със стойностите на якостните показатели ъгъл на вътрешно триене φ , кохезия c и плътността на масива γ дава възможност да се установи кои от тях и в какви граници на изменение оказват най-голямо влияние върху устойчивостта. Освен това то позволява да се установи при кои от показателите е наложително по-детайлно изучаване: на резултатите от лабораторните изпитания или по обратни изчисления. В хидрогеологията този подход се нарича факторно-диапазонов анализ. Същият ще бъде използван при нашите изследвания.

От показателите, които характеризират природната среда, ще разгледаме само тези, които участват непосредствено в аналитичния израз в някои от методите, чрез които ще се определя коефициента на устойчивост. Промяната в стойността му се представя като функция от изменението на посочените по-горе три параметъра $\Delta\eta = f(\Delta\gamma, \Delta\varphi, \Delta c)$.

За да се определи влиянието на всеки от посочените аргументи върху стойността на функцията (коефициент на устойчивост), два от трите параметъра се фиксират на първоначално приетите им стойности, използвани в практиката, а третият се променя. За да има сравнимост на резултатите, стойностите на параметрите $[\gamma, c \text{ и } \varphi]$ се изменят с едни и същи относителни разлики ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$, $\pm 20\%$, $\pm 25\%$, $\pm 30\%$).

Диапазонът на изменение на отклоненията е условно приет в интервала $[-30\%, +30\%]$.

Варирането с изчислителните стойности на показателите е осъществено програмно за изследване на устойчивостта на откоса на откривни стъпала в рудник „Трояновс-север“, които са част от надвъглищния комплекс.

В таблица 2.2.1 са посочени изчислителните стойности на физичните свойства и якостните показатели на литоложките разновидности [9].

Таблица 2.2.1

Физични свойства и якостни показатели на литоложките разновидности

№	Литоложки разновидности	Обемно тегло, $\gamma, \text{t/m}^3$	Ъгъл на вътрешно триене, $\varphi, ^\circ$	Кохезия, $c, \text{t/m}^2$
1	Глини жълтокафяви окислени	1,84	6°	4,5
2	Глини синьозелени	2,0	8°	7,4
3	Глини черни	1,75	7°	3,6

С променящите се показатели са определени коефициентът на устойчивост и относителните разлики, които се получават на изхода, спрямо варианта с възприетите базови стойности за плътността, ъгъла на вътрешно триене и кохезията. Използвани са две изчислителни схеми, при които плъзгателната повърхнина е апроксимирана с криволинейни зависимости с уравнения от вида $y=ax^2$ и $y=ax^3+bx^2+cx$. Чувствителността на изменение на коефициента на устойчивост е изследвана за различните литоложки разновидности, от които са изградени откривните стъпала: глини жълтокафяви окислени, глини синьозелени и глини черни.

Въз основа на получените крайни резултати (таблицы 2.2.2, 2.2.3 и 2.2.4) са построени графиките, представени на фигури 2.2.1, 2.2.2 и 2.2.3, които отразяват характерните зависимости за изменение стойността на коефициента на устойчивост на

откривните стъпала, изградени от различни литоложки разновидности в рудник “Трояново-север”.

Таблица 2.2.2

Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на стойността на кохезията ($c, t/m^2$)

$\Delta\epsilon, \%$	$\Delta\eta, \%$					
	$y=ax^2$			$y=ax^3+bx^2+cx$		
	Глини жълтокафяви и окислени	Глини синьозелени и	Глини черни	Глини жълтокафяви окислени	Глини синьозелени	Глини черни
-30	-22.22	-30.99	-21.65	-20.35	-29.71	-19.42
-25	-18.52	-26.90	-17.53	-16.81	-25.71	-16.50
-20	-14.81	-22.22	-14.43	-13.27	-21.71	-12.62
-15	-11.11	-17.54	-10.31	-9.73	-17.14	-9.71
-10	-7.41	-12.28	-7.22	-6.19	-12.00	-6.80
-5	-3.70	-6.43	-3.09	-3.54	-6.29	-2.91
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3.57	7.07	3.96	3.42	6.91	2.83
10	7.69	14.50	6.73	6.61	13.37	6.36
15	10.74	21.92	10.19	10.32	20.09	8.85
20	14.29	29.34	12.61	13.08	26.16	11.21
25	17.56	36.90	15.65	16.30	29.72	14.17
30	20.59	44.48	18.49	19.29	31.91	16.26

Таблица 2.2.3

Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на стойността на обемната плътност ($\gamma, t/m^3$)

$\Delta\epsilon, \%$	$\Delta\eta, \%$					
	$y=ax^2$			$y=ax^3+bx^2+cx$		
	Глини жълтокафяви и окислени	Глини синьозелени и	Глини черни	Глини жълтокафяви окислени	Глини синьозелени	Глини черни
-30	28.00	64.89	24.22	26.14	33.56	22.56
-25	22.30	49.71	19.83	20.98	33.46	18.25
-20	17.56	36.90	15.65	16.30	29.72	14.17
-15	12.90	25.65	11.01	11.72	23.91	10.43
-10	7.69	16.18	7.62	7.38	15.05	6.36
-5	3.57	7.57	3.96	3.42	6.91	3.74
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	-3.70	-6.43	-3.09	-2.65	-6.29	-2.91
10	-6.48	-11.11	-6.19	-6.19	-10.86	-5.83
15	-10.19	-15.79	-9.28	-8.85	-15.43	-7.77
20	-12.96	-19.30	-11.34	-11.50	-18.86	-10.68
25	-14.81	-22.22	-14.43	-13.27	-21.71	-12.62
30	-17.59	-25.15	-16.49	-15.04	-24.00	-14.56

Таблица 2.2.4

Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на стойността на ъгъла на вътрешно триене ($\varphi \dots \gamma$)

$\Delta\epsilon, \%$	$\Delta\eta, \%$					
	$y=ax^2$			$y=ax^3+bx^2+cx$		
	Глини жълтокафяви и окислени	Глини синьозелени и	Глини черни	Глини жълтокафяви окислени	Глини синьозелени	Глини черни
-30	-3.70	-7.02	-4.12	-3.00	-7.43	-3.88
-25	-2.78	-5.85	-3.09	-2.65	-6.29	-2.91
-20	-2.41	-4.68	-3.09	-2.12	-5.14	-2.91
-15	-1.85	-3.51	-2.06	-1.76	-4.00	-1.94
-10	-0.93	-2.34	-1.03	-1.23	-2.29	-0.97
-5	-0.56	-1.17	0.00	-0.35	-1.14	-0.97
0	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00
5	0.92	1.16	1.02	0.53	1.13	0.96
10	1.82	2.84	2.02	1.39	2.78	0.96
15	2.17	3.93	3.00	1.73	3.85	1.90
20	2.70	5.52	3.00	2.24	5.41	2.83
25	3.57	6.56	3.96	3.08	6.42	2.83
30	3.91	8.06	4.90	3.41	7.89	3.74

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

1. Най-съществено влияние върху устойчивостта на откоса на открито стъпало за условията на рудник „Трояново-север“ оказват плътността и кохезията по плъзгателната повърхнина (фиг. 2.2.1 и фиг. 2.2.2).

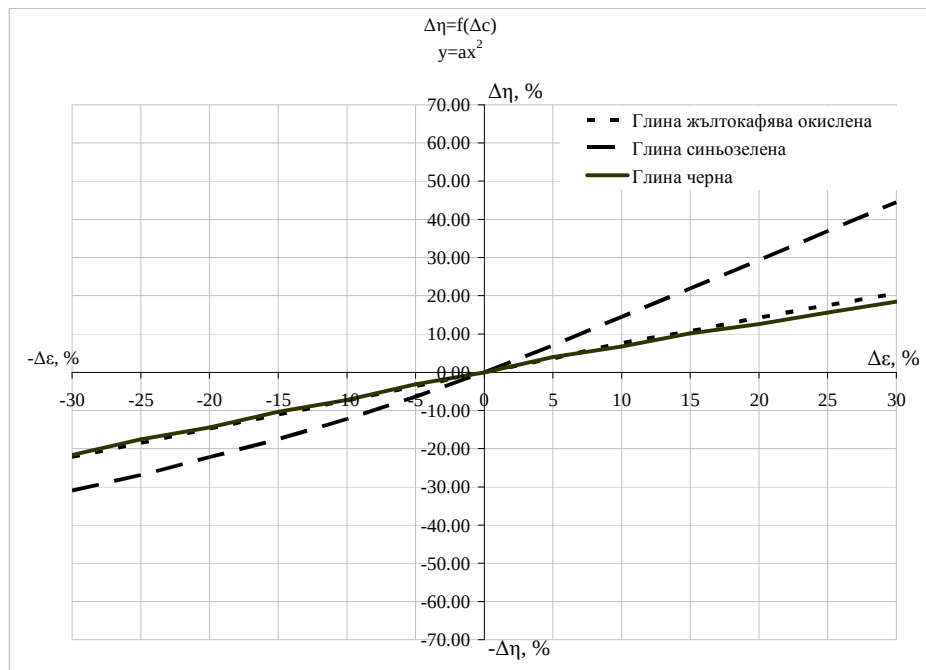
2. Не се наблюдава чувствително изменение на коефициента на устойчивост при изменение на якостните показатели в използвания математически модел на деформационния процес при различните апроксимиращи функции на плъзгателната повърхнина ($y=ax^2$ и $y=ax^3+bx^2+cx$ съответно на фигури 2.2.1, 2.2.2, и 2.2.3). Изключение прави $\Delta\eta=f(\Delta\gamma)$ при синьозелените глини (фиг. 2.2.2). Намаляването на обемната плътност с 30% ($\Delta\gamma^{30\%}=1,4 \text{ t/m}^3$) спрямо средната стойност ($\gamma = 2,0 \text{ t/m}^3$) води до значително повишени стойности за коефициента на устойчивост ($\Delta\eta=64,89\%$) при условие, че за плъзгателна повърхнина с уравнение от вида $y=ax^2$ е изчислен $\eta=1,71$.

3. При синьозелените глини малките отклонения в стойностите на входа водят до значителни промени в относителните разлики за коефициента на устойчивост (фиг. 2.2.2).

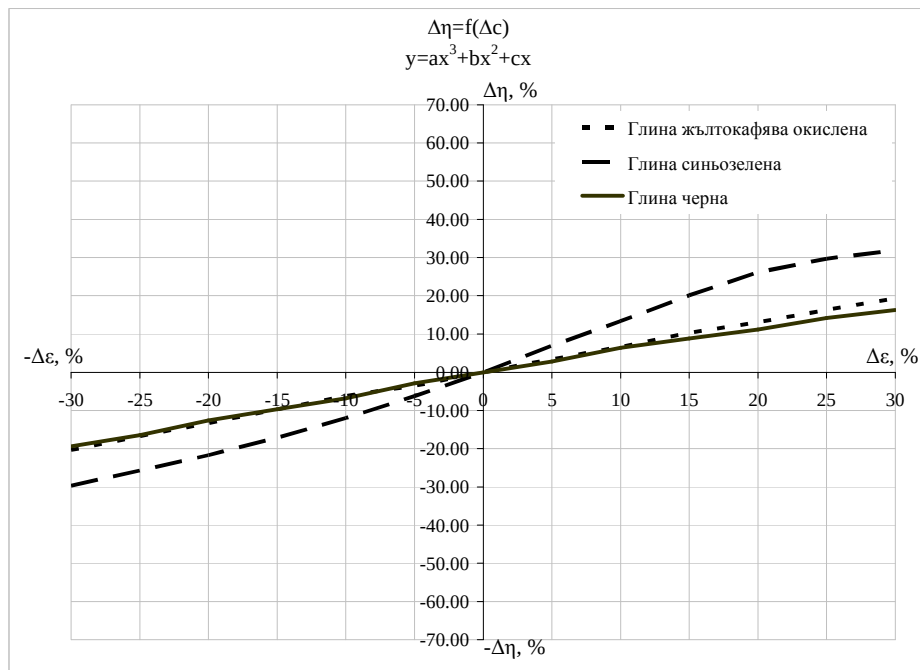
4. Най-малко се променя относителната разлика на коефициента на устойчивост когато ъгълът на вътрешно триене се изменя до 10%. И тук е налице подобна тенденция на изменение при синьозелените глини. Относителното изменение на коефициента на устойчивост при тях е почти два пъти по-чувствително в сравнение със стойностите, получени при жълтокафявите и черните глини, при които се оказва, че ъгълът на вътрешно триене не играе съществена роля върху устойчивостта.

5. При фиксирани геометрични параметри на работното стъпало, изградено от конкретна литоложка разновидност, най-чувствителни разлики се получават при синьозелените глини (фиг. 2.2.5).

6. Тенденцията на изменение на коефициента на устойчивост при жълтокафявите окислени глини (фиг. 2.2.4) и черните глини (фиг. 2.2.6) при вариране на стойностите на якостните показатели с $\pm 30\%$ (със стъпка 5%) е в следните интервали: $[-17,59\%; 28,0\%]$ – при изменение на обемната плътност; $[-22,22\%; +20,59\%]$ – при изменение на кохезията и $[-3,88\%; 3,91\%]$ – при изменение на ъгъла на вътрешно триене

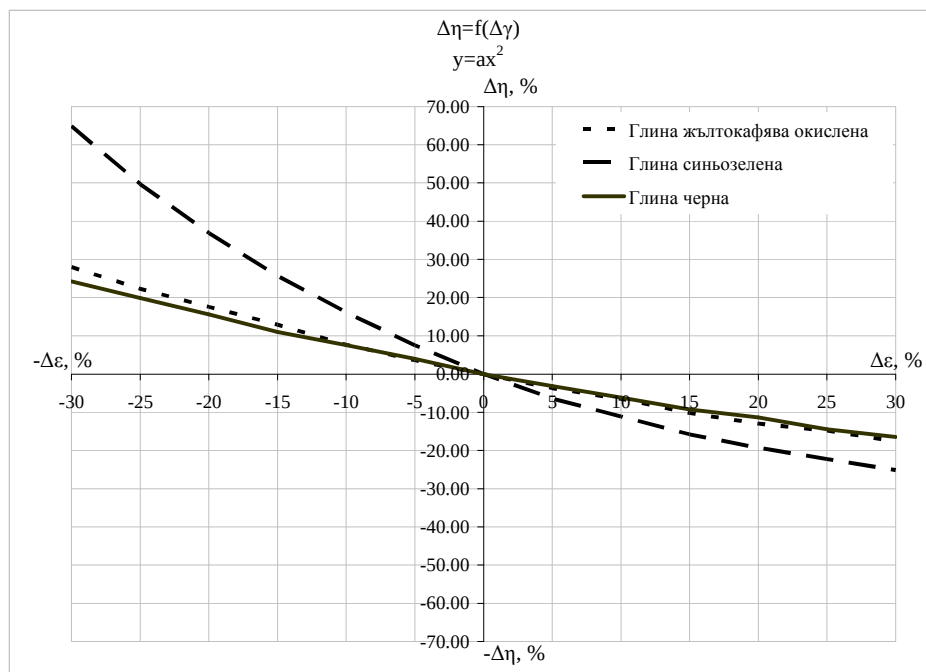


а)

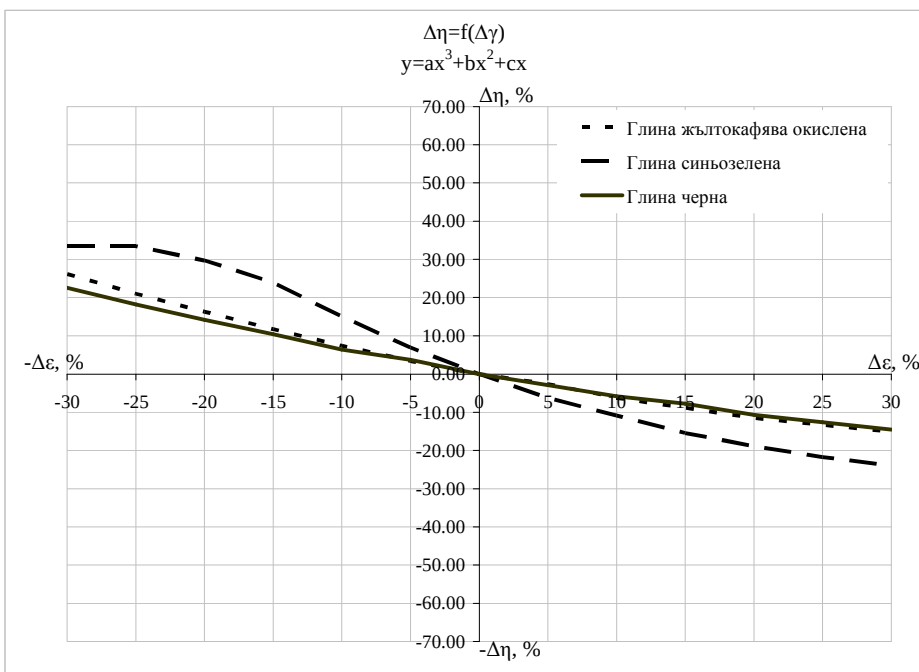


б)

Фиг.2.2.1 Изменение на коэффициента на устойчивост в зависимости от изменението на кохезията:
 а) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимость от типа $y=ax^2$ и б) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимость от типа $y=ax^3+bx^2+cx$

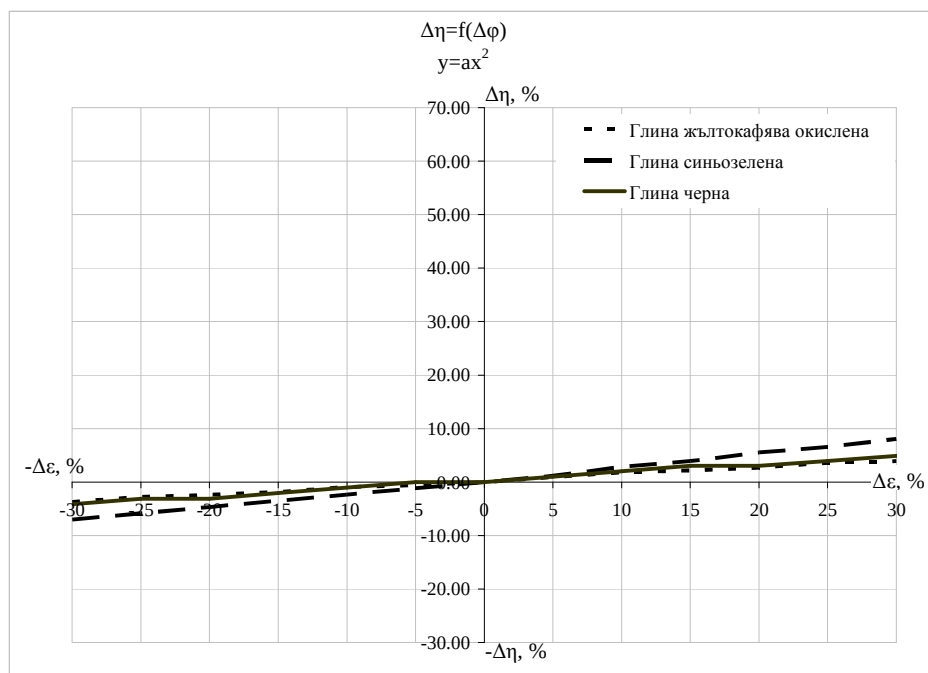


а)

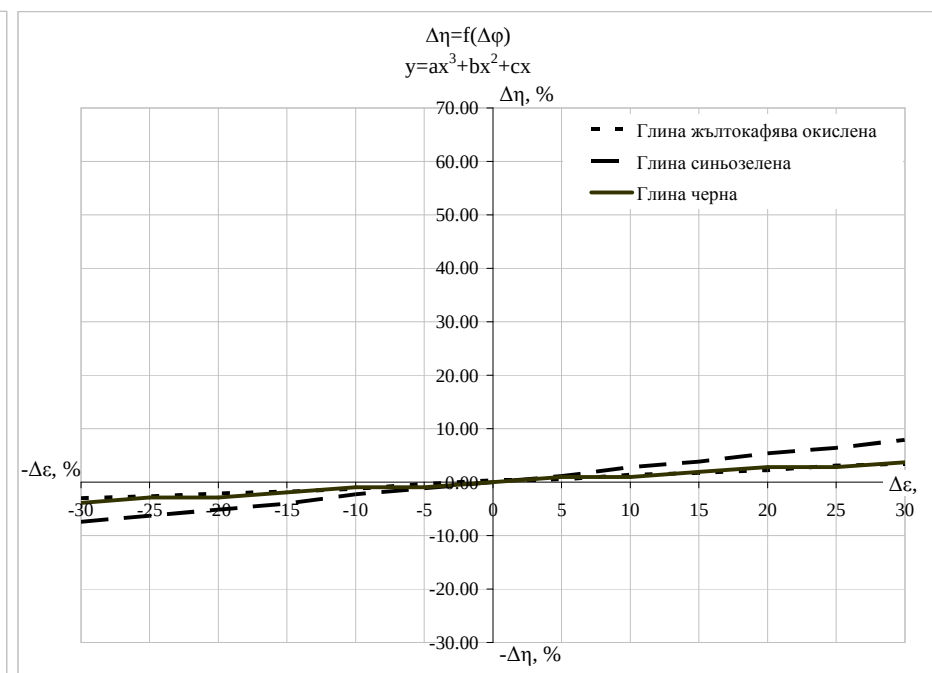


б)

Фиг.2.2.2 Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на обемната плътност:
 а) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^2$ и б) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^3+bx^2+cx$

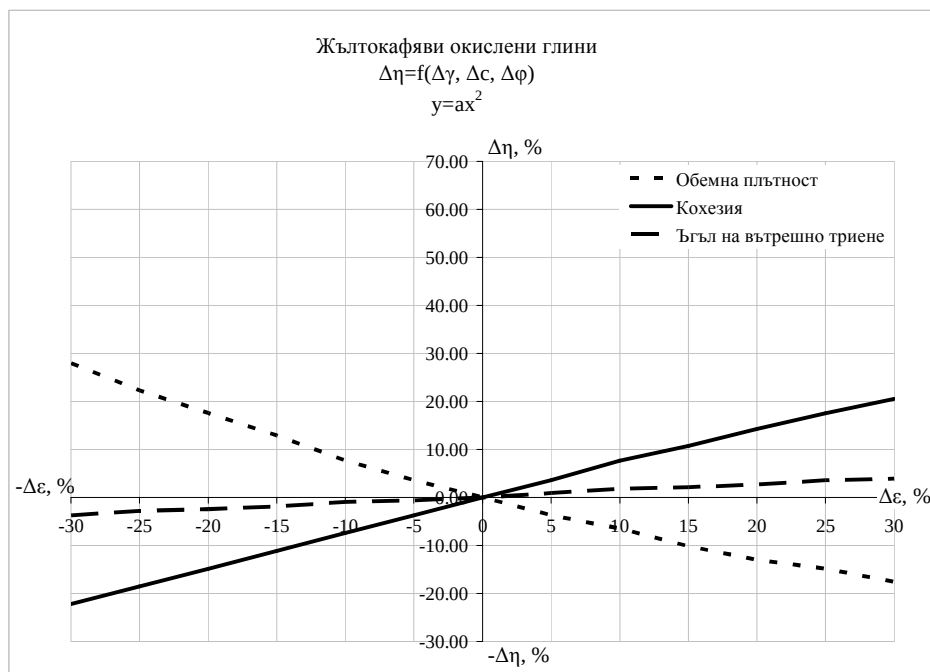


а)

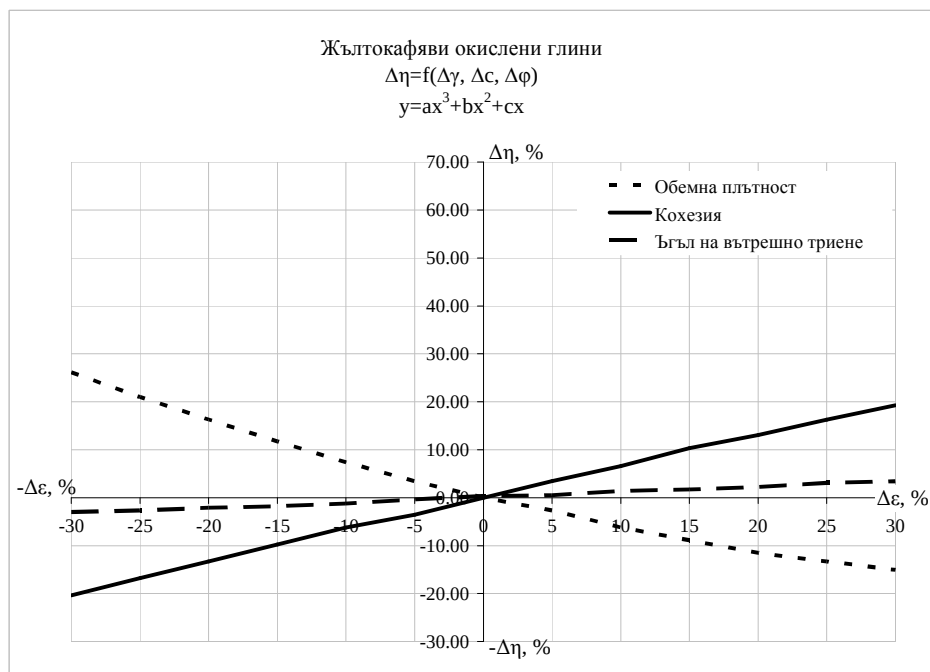


б)

Фиг.2.2.3 Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на ъгъла на вътрешно триене:
 а) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^2$ и б) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^3+bx^2+cx$

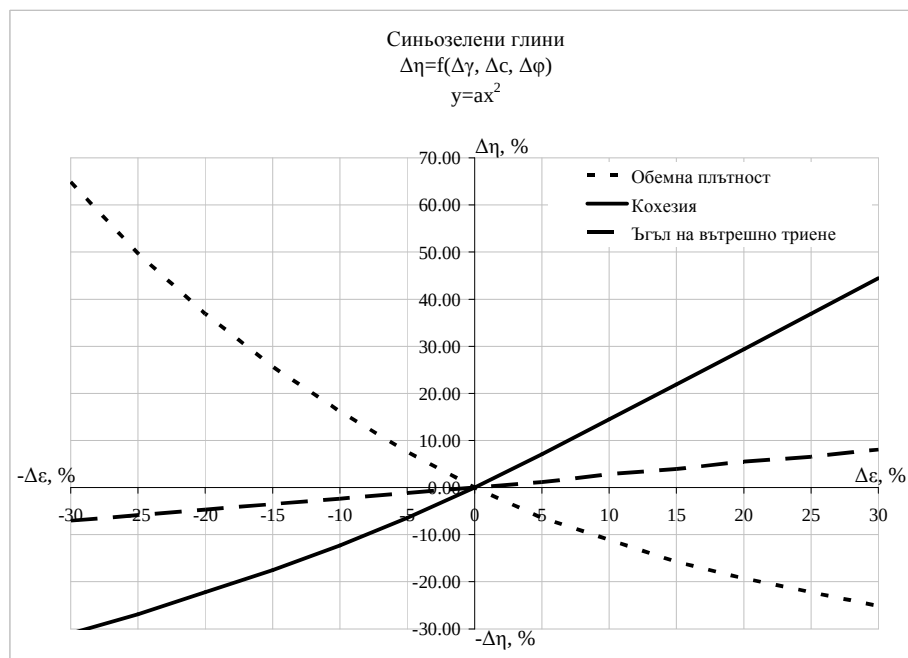


а)

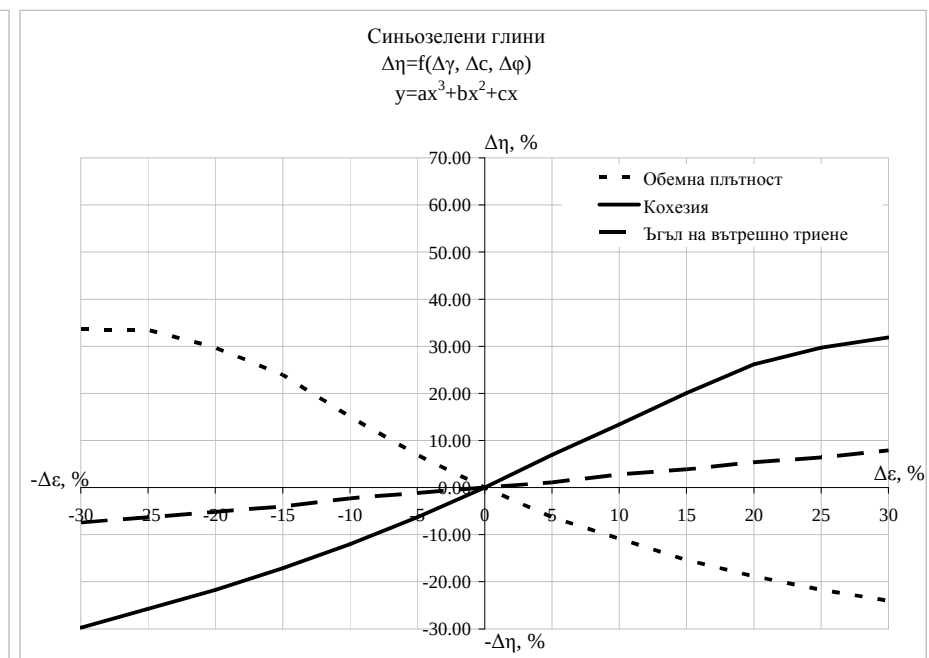


б)

Фиг.2.2.4 Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на якостните показатели на жълтокафявите глинни: а) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^2$ и б) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^3+bx^2+cx$

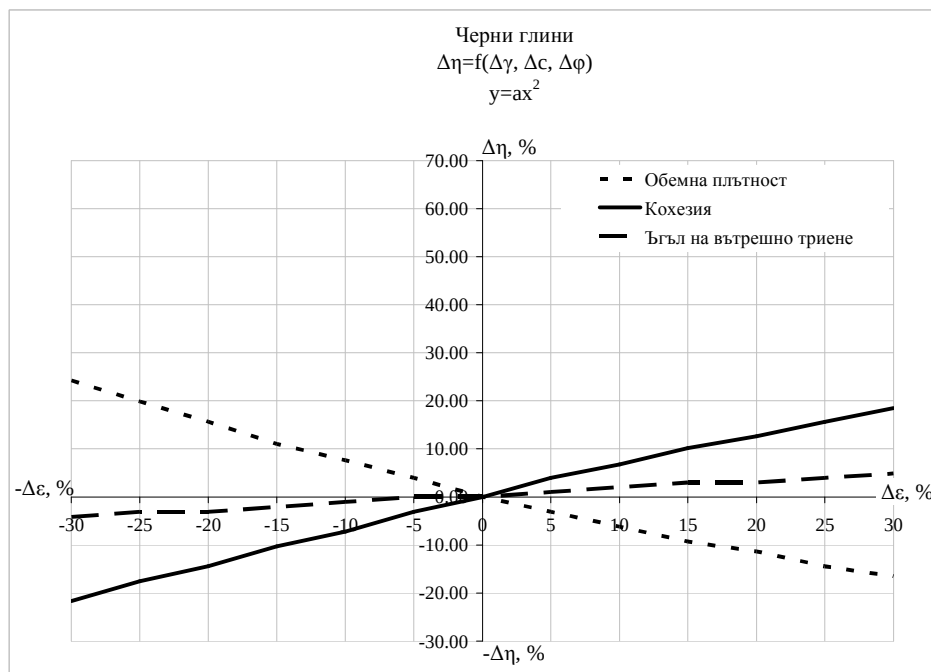


а)

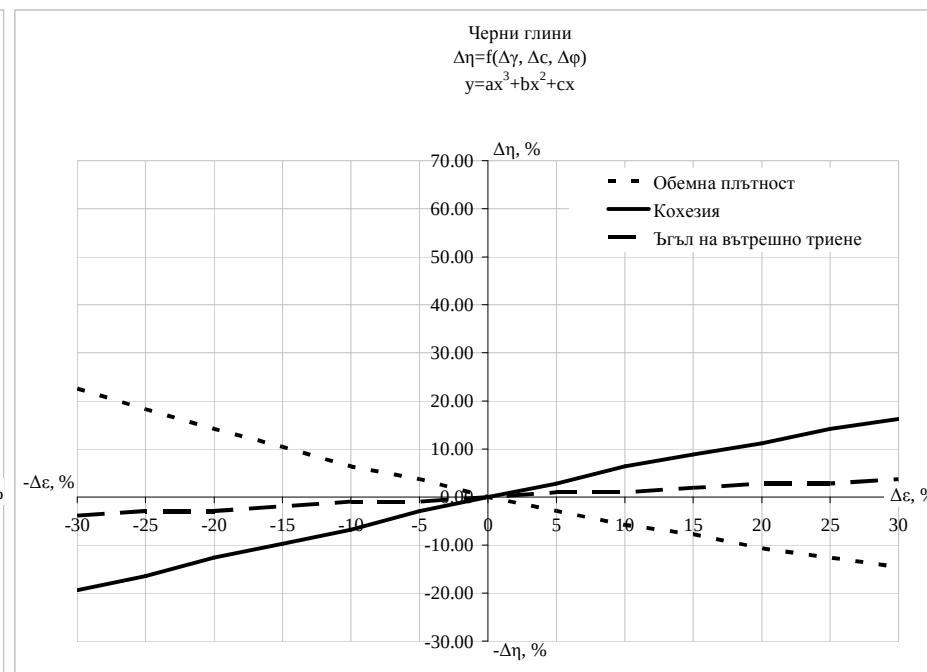


б)

Фиг. 2.2.5 Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на якостните показатели на синьозелените глин: а) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^2$ и б) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^3+bx^2+cx$



а)



б)

Фиг. 2.2.6 Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на якостните показатели на черните глини: а) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^2$ и б) при апроксимиране на плъзгателната повърхнина с криволинейна зависимост от типа $y=ax^3+bx^2+cx$

2.3. Изследване влиянието на изменението в стойностите на технологичните параметри върху устойчивостта на работно стъпало (на основата на рудник „Трояново-север“)

Както вече беше посочено, устойчивостта на работните стъпала зависи от природните и минно-техническите условия. Трябва да се отбележи, че елементите от групата на природните фактори, които участват непосредствено при определяне на устойчивостта на откосите могат само да бъдат оценявани, но не и управлявани.

Използваните при стабилитетните изчисления технологични параметри могат да бъдат управлявани в достатъчно широки граници.

По естествен път възниква въпроса за влиянието на изменението на стойностите на технологичните параметри върху устойчивостта на работното стъпало. Този въпрос е особено актуален като се вземе под внимание и факта, че в ежедневната практика тези параметри непрекъснато търпят промяна, което определя открития рудник като динамична система.

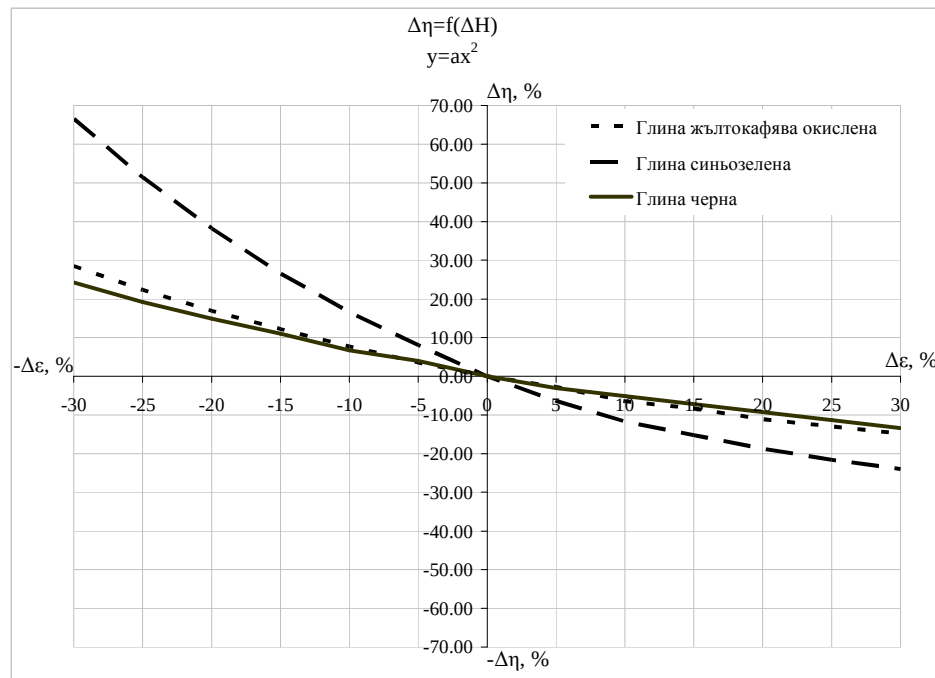
Изследването на влиянието на технологичните параметри върху устойчивостта на работно стъпало е извършено аналогично на физичните свойства и якостните показатели при едни и същи условия и изчислителни модели. В таблици 2.3.1 и 2.3.2 са представени резултатите от реализацията на факторно-диапазонния анализ по отношение на изменението на височината на стъпалото и ъгъла на откоса.

За онагледяване са представени графиките на зависимостите на фигури 2.3.1 и 2.3.2.

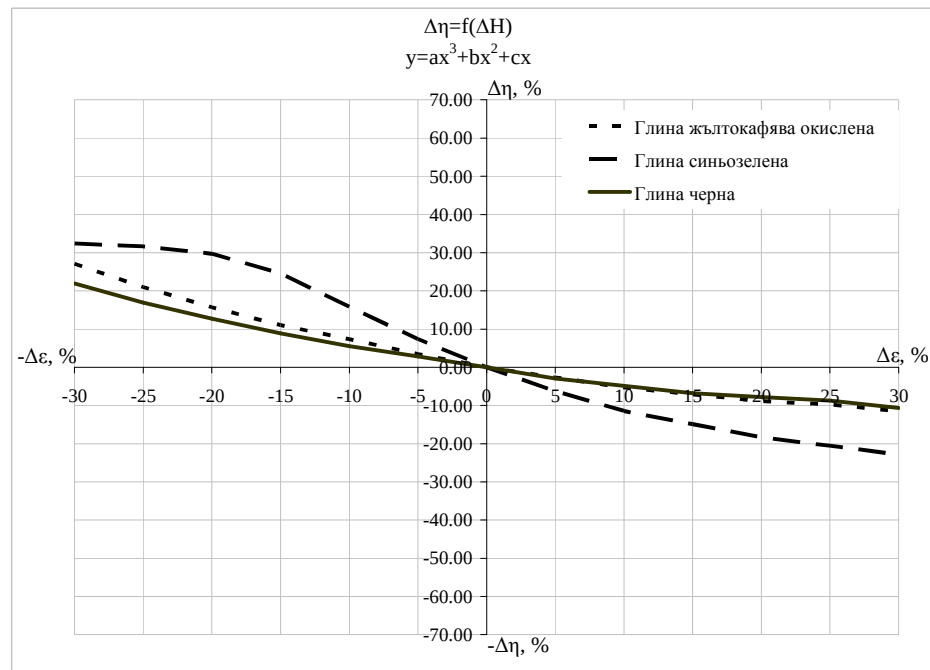
Таблица 2.3.1

Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на стойността на височината на стъпалото (H, m)

$\Delta\epsilon$, %	$\Delta\eta$, %					
	$y=ax^2$			$y=ax^3+bx^2+cx$		
	Глини жълтокафяви и окислени	Глини синьозелени и	Глини черни	Глини жълтокафяви окислени	Глини синьозелени	Глини черни
-30	28.48	66.60	24.22	27.10	32.43	21.97
-25	22.30	51.42	19.17	20.98	31.64	16.94
-20	16.92	38.27	14.91	15.67	29.72	12.71
-15	12.20	26.61	11.01	11.02	24.57	8.85
-10	7.69	16.59	6.73	7.38	15.87	5.50
-5	3.57	8.06	3.96	3.42	7.41	2.83
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	-2.78	-6.43	-3.09	-2.65	-6.29	-2.91
10	-6.48	-11.70	-5.15	-5.31	-11.43	-4.85
15	-8.33	-15.20	-7.22	-7.08	-14.86	-6.80
20	-11.11	-18.71	-9.28	-8.85	-18.29	-7.77
25	-12.96	-21.64	-11.34	-9.73	-20.57	-8.74
30	-14.81	-23.98	-13.40	-11.50	-22.86	-10.68

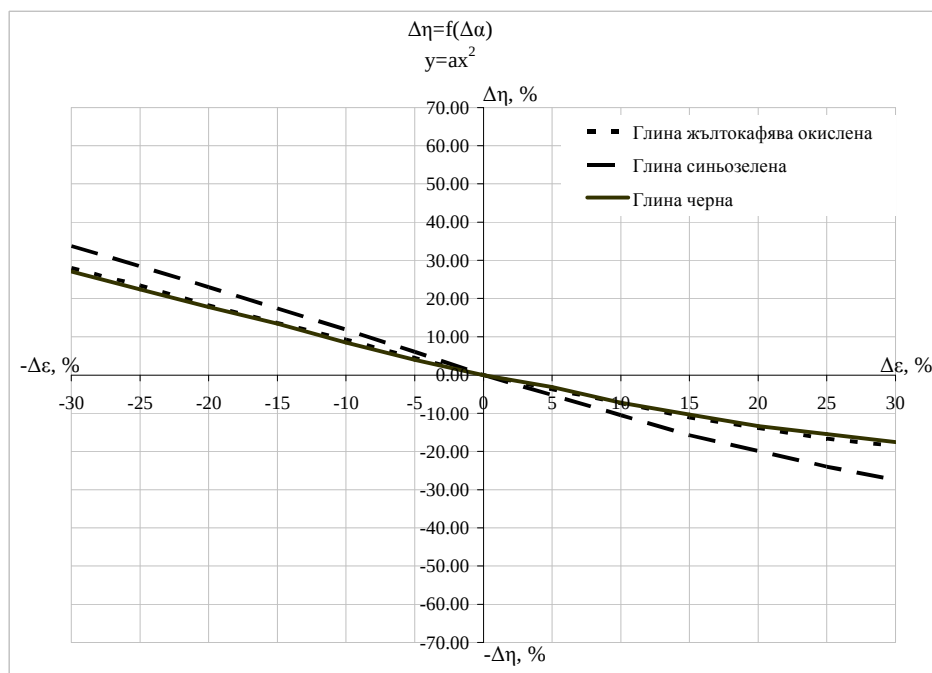


а)

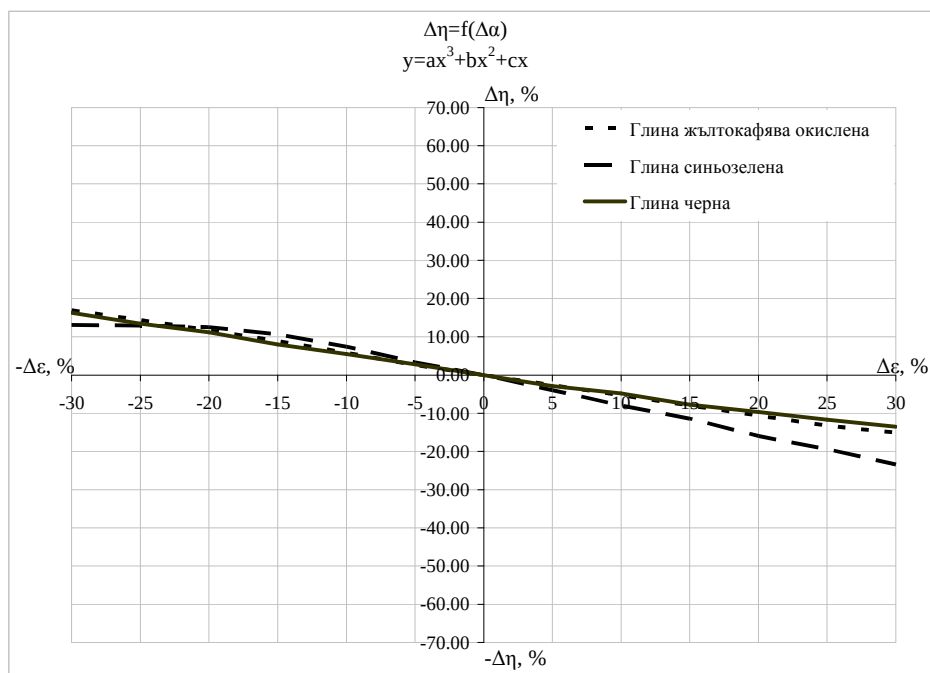


б)

Фиг. 2.3.1 Изменение на коэффициента на устойчивость в зависимости от изменението на стойността на височината на стъпалото (H , m)



а)



б)

Фиг. 2.3.2 Изменение на коэффициента на устойчивост в зависимости от изменении на стойността на ъгъла на откоса на стъпалото (α ... γ)

Таблица 2.3.2

Изменение на коефициента на устойчивост в зависимост от изменението на стойността на ъгъла на откоса ($\alpha, \dots$)

$\Delta\epsilon, \%$	$\Delta\eta, \%$					
	$y=ax^2$			$y=ax^3+bx^2+cx$		
	Глини жълтокафяви и окислени	Глини синьозелени и	Глини черни	Глини жълтокафяви окислени	Глини синьозелени	Глини черни
-30	28.00	33.72	27.07	16.91	13.11	16.26
-25	23.40	28.45	22.40	14.39	12.94	13.45
-20	18.18	22.97	17.80	11.72	12.50	11.21
-15	13.60	17.39	13.39	8.87	10.71	8.04
-10	9.24	11.86	8.49	5.83	7.41	5.50
-5	4.42	6.04	3.96	2.59	3.31	2.83
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	-3.70	-5.26	-3.09	-2.65	-4.00	-2.91
10	-7.41	-10.53	-7.22	-5.31	-8.00	-4.85
15	-11.11	-15.79	-10.31	-7.96	-11.43	-7.77
20	-13.89	-19.88	-13.40	-10.62	-16.00	-9.71
25	-16.67	-23.98	-15.46	-13.27	-19.43	-11.65
30	-18.52	-27.49	-17.53	-15.04	-23.43	-13.59

От приведените графики се установява, че височината на стъпалото оказва съществено влияние върху устойчивостта на откоса. Тази зависимост е много силно изразена при синьозелените глини, особено когато плъзгателната повърхнина е апроксимирана с уравнение от вида $y=ax^2$ (фиг. 2.3.1). Това ни даде основание да се потърси корелационна зависимост между коефициента на устойчивост и височината на стъпалото.

Аналитичните зависимости са:

- при синьозелени глини и апроксимиране на плъзгателната повърхнина с уравнение от вида $y=ax^2$ се получава

$$\eta = -0,0186H^3 + 0,9797H^2 - 17,834H + 83,445 \quad (2.3.1)$$

при коефициент на детерминация $R^2 = 0.9999$

- при синьозелени глини и апроксимиране на плъзгателната повърхнина с уравнение от вида $y=ax^3+bx^2+cx$ се получава

$$\eta = 0,0702H^3 - 1,3514H^2 + 1,5H + 33,533 \quad (2.3.2)$$

$R^2 = 0.9947$

От изразите (2.3.1) и (2.3.2) се вижда, че коефициентите пред третата степен на аргумента са достатъчно малки, така че за практически изчисления с достатъчна точност могат да се използват и зависимости от втора степен. В този случай коефициентите на детерминация се получават съответно 0,9992 и 0,9757.

Диапазонът на процентното изменение на коефициента на устойчивост при процентно изменение на височината на стъпалото в интервала $[-30\%; +30\%]$ при жълтокафявите и черните глини е от -10,68% до 28,48%. Може да се направи извода, че намаляването на височината на стъпалото е с по-голяма тежест за сметка на нарастване на стабилитета на стъпалото. При тези глини връзката между коефициента на устойчивост и височината на стъпалото се приема от втора степен:

- жълтокафяви глини - $y=ax^2$

$$\eta = 0,1864H^2 - 6,1509H + 33,98$$

$R^2 = 0,9995$

жълтокафяви глини - $y=ax^3+bx^2+cx$

$$\eta = 0,2148H^2 - 6,1337H + 32,514$$

$$R^2 = 0,9993$$

- черни глини - $y=ax^2$

$$\eta = 0,1445H^2 - 5,103H + 28,964$$

$$R^2 = 0,9993$$

черни глини - $y=ax^3+bx^2+cx$

$$\eta = 0,1662H^2 - 4,9619H + 26,344$$

$$R^2 = 0,999$$

Като технологичен параметър ъгълът на откоса на работното стъпало също оказва съществено влияние върху устойчивостта на откоса. От графиките на фиг. 2.3.2 се установява, че неговото изменение кореспондира с формата на плъзгателната повърхнина. Когато плъзгателната повърхнина се представя с уравнение на крива от типа $y=ax^2$, то коефициентът на устойчивост нараства в зависимост от типа глини от 27,07% до 33,72%, като тенденцията се запазва за синьозелените глини. Връзката между коефициента на устойчивост и ъгъла на откоса на стъпалото е линейна:

- синьозелени глини - $y=ax^2$

$$\eta = -5,255\alpha + 38,132$$

$$R^2 = 0,9965$$

- синьозелени глини - $y=ax^3+bx^2+cx$

$$\eta = -3,2945\alpha + 21,346$$

$$R^2 = 0,9727$$

- жълтокафяви глини - $y=ax^2$

$$\eta = -3,9742\alpha + 29,786$$

$$R^2 = 0,9886$$

- жълтокафяви глини - $y=ax^3+bx^2+cx$

$$\eta = -2,7333\alpha + 19,552$$

$$R^2 = 0,9986$$

- черни глини - $y=ax^2$

$$\eta = -3,7981\alpha + 28,594$$

$$R^2 = 0,9871$$

- черни глини - $y=ax^3+bx^2+cx$

$$\eta = -2,5391\alpha + 18,297$$

$$R^2 = 0,9968$$

Обобщено може да се каже, че:

- малки изменения на входа на модела (в случая, изменения на височината) водят до значителни изменения на изхода;

- ако се приеме някоя от изменящите се височини за базисна (в табл. 2.3.1), то изменението на коефициента на устойчивост спрямо нея не е еднакво; така например, при равни други условия намаляването на височината на работно стъпало, изградено от синьозелени глини с 2,8 m (с 20%) по-бързо увеличава коефициента на устойчивост ($\eta=2,77$), отколкото повишаването на същата височина с 2,8 m води до намаляването му - $\eta=1,39$ (фиг. 2.3.1). Разликата в процентно отношение е 19,56%. Оттук следва практическият извод, че управление на устойчивостта на работното стъпало най-бързо и най-ефективно може да се осъществи с намаляване на височината.

Основният извод, който може да бъде направен от вариантният анализ при технологичните параметри е, че малки изменения във височината и ъгъла на откоса на стъпалото водят до чувствителна промяна в стойността за коефициента на устойчивост. По-бързото изменение на коефициента на устойчивост при изменение на технологичните параметри доказва, че управлението на устойчивостта на откоса най-бързо и ефективно може да се осъществи чрез промяна на технологичните параметри.

За да се изследва устойчивото състояние на работните стъпала (респективно и на борда като цяло) при отчитане на съвместното изменение на повечето от факторите,

оказващи съществено влияние е необходимо да се използват методите на математическото моделиране и реализирането им посредством компютърни програми.

Глава 3. Създаване на вероятностен модел за оценка надеждността на работно стъпало

3.1. Статистическо моделиране и приложението му при оценка надеждността на работно стъпало

3.1.1. Случайни числа и случайни величини

За случайни числа се говори в смисъл на последователност от независими едно от друго числа с определен вероятностен закон на разпределение, т.е. всяко от тези числа е получено по случаен начин (без връзка с останалите числа от последователността). Обикновено, ако не е указано друго, се има предвид равномерно разпределени числа в интервала $[0, 1)$. В настоящата работа е използван вграденият в Microsoft Visual Studio .NET генератор за случайни числа.

За да бъде зададена случайна величина трябва да се укаже какви стойности тя може да приема и какви са вероятностите да приема тези стойности.

Случайните величини могат да бъдат дискретни и непрекъснати.

Една случайната величина ξ се нарича дискретна ако може да приема крайно или изброимо множество от стойности $x_1, x_2, \dots, x_N$.

Дискретната случайна величина при крайно множество от стойности се определя с таблица

$$\xi = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_N \\ p_1 & p_2 & \dots & p_N \end{pmatrix}$$

където $x_1, x_2, \dots, x_N$ са възможни стойности на величината ξ , а $p_1, p_2, \dots, p_N$ са съответстващите им вероятности. По-точно казано вероятността случайната величина ξ да приеме стойността x_i (да я обозначим с $P\{\xi = x_i\}$) е равна на p_i :

$$P\{\xi = x_i\} = p_i, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Математическо очакване за случайната величина ξ се нарича числото

$$E\xi = \sum_{i=1}^N x_i p_i.$$

Тъй като $p_1 + p_2 + \dots + p_N = 1$, то горната формула може да се запише и във вида:

$$E\xi = \sum_{i=1}^N x_i p_i / \sum_{i=1}^N p_i$$

От тук се вижда, че $E\xi$ е средното значение на величината ξ , при което вероятностите стойности x_i влизат в сумата с по-големи тегла.

Дисперсия на случайната величина ξ се нарича числото $D\xi = E[(\xi - E\xi)^2]$. Следователно дисперсията $D\xi$ представлява математическото очакване на квадрата на отклонението на случайната величина ξ от нейното математическо очакване $E\xi$. Очевидно винаги $D\xi > 0$.

Средноквадратичното отклонение на случайната величина ξ се нарича числото $\sigma\xi = \sqrt{D\xi}$.

Ако наблюдаваме величината ξ многократно и получим стойностите $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ (всяка от които ще е равна на някое от числата $x_1, x_2, \dots, x_N$), то според закона за големите числа средното аритметично на тези стойности ще бъде близко до $E\xi$, т.е.

$$\frac{1}{N}(\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_N) \approx E\xi$$

Дисперсията $D\xi$ характеризира разсейването на стойностите $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ около математическото очакване $E\xi$.

3.1.2. Метод Монте-Карло

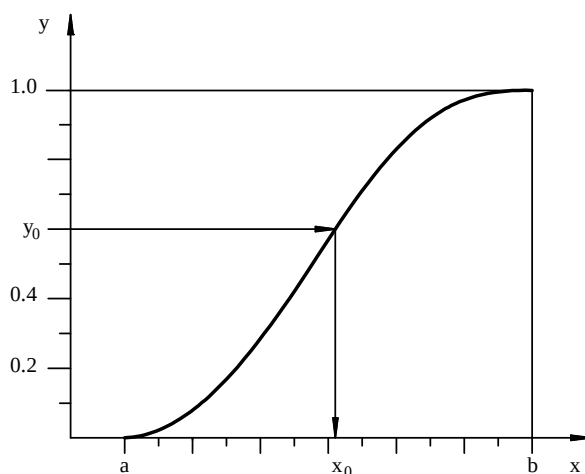
Методът Монте-Карло е изчислителен метод за решаване на математически задачи чрез моделиране на случайни величини. Затова някои автори го наричат метод на статистическите проверки. Намира широко приложение главно поради две причини: лесен е за приложение и с негова помощ се получават решения на актуални приложни задачи, които не могат да бъдат решени аналитично.

В основата на метода лежи законът за големите числа [6, 8], т.е. ако $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_N$ са независими случайни величини с едно и също математическо очакване $E\xi_i = a$, то при големи стойности на N може да се приеме, че

$$\frac{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \dots + \xi_N}{N} \approx a$$

Нека ξ е случайна величина с функция на разпределение $F(x) = P\{\xi < x\}$. Разглеждаме случая когато $F(x)$ е непрекъсната. Тъй като $F(x)$ е монотонна, то съществува обратната ѝ функция F^{-1} , т.е. ако $y_0 = F(x_0)$, където $0 < y_0 < 1$, то $F^{-1}(y_0) = x_0$ (фиг. 3.1.1)

В [6] е доказано, че $F^{-1}(y)$ има същата функция на разпределение, както и ξ . Следователно ако $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N, \dots$ е една редица от равномерно разпределени случайни числа, то $F^{-1}(\eta_1), F^{-1}(\eta_2), \dots$ ще бъде редица от случайни числа със закона на разпределение $F(x)$.



Фиг. 3.1.1

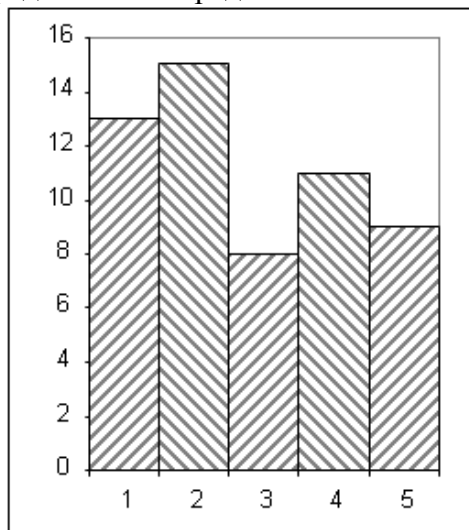
При моделиране на системи със случайни определящи характеристики не винаги е известен точният вид на функцията на разпределение $F(x)$, нито пък истинските стойности на параметрите на разпределението. Известна е само емпиричната функция на разпределение

$\hat{F}(x) = \frac{n_x}{n}$ (n_x е натрупаната (комулативна) честота) или хистограмата, от която $\hat{F}(x)$ се получава лесно. Графиката на $\hat{F}(x)$ е стъпаловидна. Доказано е [6], че когато n клони към безкрайност, $\hat{F}(x)$ клони към $F(x)$. Тази функция е удобна за работа не само при дискретни случайни величини, но и при непрекъснати.

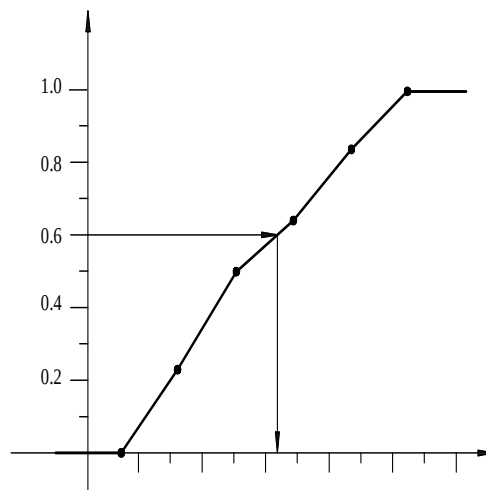
И така ако ξ е непрекъсната случайна величина, а следователно и нейната функция на разпределение също ще е непрекъсната, минаваме към интервално статистическо разпределение, както следва:

ξ	$[x_0; x_1)$	$[x_1; x_2)$	...	$[x_{n-2}; x_{n-1})$	$[x_{n-1}; x_n]$
Честоти	ν_1	ν_2	...	ν_{n-1}	ν_n
Натрупани честоти	γ_1	γ_2	...	γ_{n-1}	γ_n

Кумулативната функция може да се представи като линеен сплайн (фиг. 3.1.2). В [6] е показано, че при големи стойности на n тази функция клони към функцията на разпределение на ξ и е посочено как се построява в случай, че натрупаните честоти са съсредоточени в средите на съответните интервали.



Хистограма на относителните честоти



Графика на натрупаните относителни честоти

Фиг. 3.1.2

На същото основание, но по-лесно, кумулативната функция $\tilde{F}(x)$ може да се построи, като се счита, че кумулативните честоти са съсредоточени в левите или в десните краища на съответните интервали (формула 3.1.1):

$$\tilde{F}(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < x_0 \\ \frac{\gamma_1}{(x_1 - x_0)}(x - x_0), & \text{при } x \in [x_0, x_1) \\ \frac{\gamma_{i+1} - \gamma_i}{(x_{i+1} - x_i)}(x - x_i) + \gamma_i, & \text{при } x \in [x_i, x_{i+1}), i = 1, 2, \dots, n-1 \\ 1, & \text{при } x > x_n \end{cases} \quad (3.1.1)$$

Функцията $\tilde{F}(x)$, построена по един от гореуказаните начини, е непрекъсната и монотонно растяща, следователно съществува нейната обратна $\tilde{F}^{-1}$. Случайни числа, разпределени по закона $\tilde{F}(x)$, могат да бъдат получени по формулата $\xi_i = \tilde{F}^{-1}(\lambda_i)$, където $\{\lambda_i\}$ е редица от равномерно разпределени в интервала $[0; 1)$ случайни числа.

Основно предимство на Метода Монте-Карло е простотата на изчислителния алгоритъм, посредством който се реализира. Обикновено се съставя компютърна програма за осъществяване на едно изпитание. След това този процес се повтаря n пъти, при което всеки опит не зависи от останалите. Накрая се извършва осредняване и получената стойност се приема за оценка на изследвания признак.

3.1.3. Точност на оценките, получени по метода на Монте-Карло

Оценките за грешките при пресмятанията с метода на статистическото моделиране имат вероятностен характер, т.е. посочват се границите, в които с достатъчна степен на достоверност (с вероятност близка до единица) може да се твърди, че е заключена истинската стойност на изчисляваната величина [6].

Точната оценка на грешката при пресмятанията по Метода Монте-Карло във всеки конкретен случай е различна. На базата на основната идея на метода може да се посочи и обща методика за оценка на допуснатата грешка. Ако се търси стойност на някаква величина a , то почти винаги приблизителната стойност на a се получава като средно аритметично

$$\bar{a} = \frac{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \dots + \xi_N}{N}$$

от N независими наблюдения за случайна величина ξ , чието математическо очакване е $E\xi = a$.

Предполага се още, че величината ξ има крайна дисперсия, т.е.

$$\sigma^2 = D\xi = E(\xi - a)^2 < +\infty.$$

Въпросът е колко наблюдения трябва да се направят (т.е. каква да бъде стойността на N), за да може с вероятност p да се твърди, че равенството $\bar{a} \approx a$ има точност някакво предварително зададено малко положително число ε .

В [6] е показано, че

$$P\{|\bar{a} - a| < \varepsilon\} = p \approx 2\Phi\left(\frac{\varepsilon\sqrt{N}}{\sigma}\right) - 1,$$

където $\Phi(x)$ е стандартната нормална функция на разпределение (функцията на Лаплас), а σ^2 е дисперсията на ξ .

Следователно при зададена точност ε надеждността на оценката е

$$p \approx 2\Phi\left(\frac{\varepsilon\sqrt{N}}{\sigma}\right) - 1$$

Като се използва горната формула може да се пресметне приблизителният брой изпитания N , които трябва да бъдат извършени, за да се получи оценка с точност ε и желана надеждност p при известна дисперсия σ^2 , а именно

$$N = \frac{\sigma^2 t_p^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.1.1)$$

където t_p е решение на уравнението $\Phi(t) = \frac{1}{2}(1 - p)$.

От формула (3.1.1.) е ясно, че броят на необходимите изпитания за достигане на определената надеждност е по-малък при по-малка дисперсия.

В случай, че дисперсията σ^2 на изследвания признак не е известна, както е в повечето практически задачи, то може да се постъпи по следния начин: Планира се някакъв брой на експериментите N_1 . По резултатите от тези N_1 на брой изпитания се определя едно приближение на дисперсията σ^2 по формулата

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} (\xi_i - \bar{a})^2$$

С пресметнатата стойност $\bar{\sigma}^2$ по формула (3.1.1.) се изчислява N . Ако се окаже, че $N > N_1$, се правят допълнително още $N - N_1$ опита и пак се прави преоценка за N . Така след краен брой стъпки се достига до нужния брой изпитания.

3.1.4. Оценка на вероятността за устойчивост, респективно риска от свличане

Критерий за оценка на устойчивостта на работното стъпало е коефициентът на устойчивост, т.е. отношението на задържащите сили A към свличащите сили B . Стъпалото е устойчиво когато коефициентът на устойчивост е по-голям или равен на 1, т. е. $A \geq B$.

Задържащите сили A и свличащите сили B са функции на едни и същи случайни величини

$$A = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5), \quad B = g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5),$$

където

x_1 - височина на стъпалото;

x_2 - ъгъл на стъпалото;

x_3 - обемна плътност;

x_4 - ъгъл на вътрешно триене;

x_5 - кохезия.

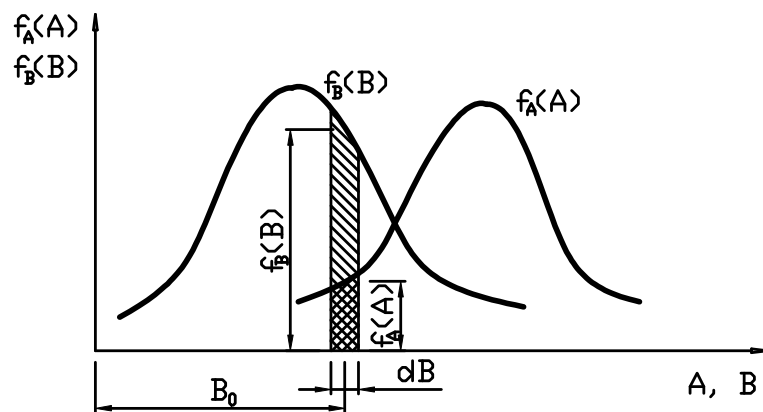
В този случай вероятността за устойчиво състояние на системата може да се даде с изрази:

$$R = P(A > B) \quad (3.1.2)$$

Да означим с $f_A(A)$ плътността на разпределение на задържащите сили A , а с $f_B(B)$ плътността на разпределение на свличащите сили B . Както е посочено в [61] вероятността R за устойчивост на стъпалото може да се определи с един от изразите (3.1.3) или (3.1.4):

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_B(B) \left[\int_B^{\infty} f_A(A) dA \right] dB \quad (3.1.3)$$

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_A(A) \left[\int_{-\infty}^A f_B(B) dB \right] dA \quad (3.1.4)$$



Фиг. 3.1.4. Препокриване на законите на разпределение на задържащите $f_A(A)$ и свличащите $f_B(B)$ сили

Решаването на интегралите в (3.1.3) или (3.1.4) по аналитичен път е свързано със значителни трудности и затова в [61] се предлага използване на преобразуването на Мелин, което може да се прилага при всяко разпределение и при достатъчен обем експериментални данни и има следния вид:

$$G = \int_B^{\infty} f_A(A) dA = 1 - F_A(A),$$

$$H = \int_0^B f_B(B)dB = F_B(B)$$

Последното уравнение може да бъде записано като:

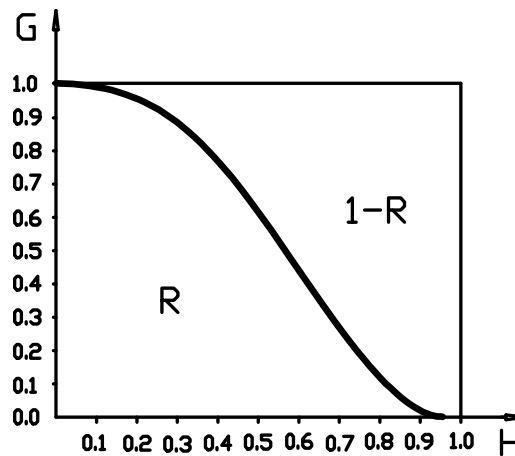
$$dH = f_B(B)dB$$

С отчитане на тези зависимости и като се има пред вид, че стойностите на H се изменят в интервала $[0, 1]$ за вероятността за устойчивост се получава следния израз:

$$R = \int_0^1 G dH \quad (3.1.5)$$

Интегралът от (3.1.5) обикновено се решава числено. В настоящата разработка всички интеграли, които не могат да се решат аналитично, са решавани числено по метода на Симпсън. За целта авторът е разработил метод Simpson в клас Utils от разработения програмния продукт.

Геометричната интерпретация на горния израз (фиг. 3.1.5) е следната: вероятността R за устойчивост е равна на площта под кривата на зависимостта $G = f(H)$, респективно рискът от свличане $(1 - R)$ – това е площта над тази крива.



Фиг. 3.1.5. Графика на зависимостта $G = f(H)$

С помощта на данните за задържащите сили A и за свличащите сили B , получени в резултат на численото моделиране, се определят емпиричните функции на разпределение на свличащите $\hat{F}_B(B)$ и задържащите $\hat{F}_A(A)$ сили, които се използват за оценка на неизвестните функции на разпределение $F_A(A)$ и $F_B(B)$.

След построяване на емпиричните функции на разпределение могат да се определят стойностите на G и H .

Като количествен показател за вероятността от възникване на деформационни процеси и явления по отношение на устойчивостта на откосите може да се използва т.нар. емпиричен риск, дефиниран в [59], представен с класическата формула за вероятност:

$$R = \frac{m}{n}, \quad (3.1.6.)$$

където m е броят на резултатите, при които задържащите сили са по-големи или равни на свличащите, т.е. коефициентът на устойчивост е по-голям или равен на 1, а n е общият брой на резултатите от проведените изчисления за оценка устойчивостта на откоса. От направени от автора изчисления се вижда, че при големи стойности на n (в случая $n=5000$) резултатите, получени по формули (3.1.5) и (3.1.6) са почти идентични. Предвид простотата на (3.1.6) в много случаи тя е за предпочитане и дава достатъчно представителни резултати.

3.2. Оценка на устойчивостта на еднородно работното стъпало при съвместното изменение (влияние) на физичните свойства, якостните показатели и технологичните параметри.

3.2.1. Въведение

Повечето от изчислителните методи за определяне на коефициента на устойчивост се основават на изчисляване на отношението между задържащите и свличащите сили по приетата повърхнина на плъзгане, т.е.

$$\eta = \frac{tg \varphi \sum_{i=1}^n N_i + c L}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (3.2.1)$$

където:

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

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

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

Така записана формулата е достатъчно ясна и определена, но за постигане на достоверни резултати в практиката трябва да се отчетат следните два момента, които рязко усложняват задачата за намиране на коефициента на устойчивост:

1. Определяне на формата и положението на повърхнината на плъзгане, при това по възможност за най-неблагоприятния случай.
2. Отчитане на вероятностния характер на природната среда.

Установяването на формата и положението на повърхнината на плъзгане е една от най-важните и трудни задачи. В общия случай тя не е решима математически точно. Затова и съществуват толкова много изчислителни процедури. Голямо влияние оказва геологията на обекта и физико-механичните характеристики на почвите. Затова в някои случаи задачата за намиране на коефициента на устойчивост се решава като се разглеждат няколко фамилии хлъзгателни повърхнини и се търси тази, при която коефициентът на устойчивост приема най-малка стойност. В предлаганата работа потребителят има възможност да избира измежду 10 вида хлъзгателни повърхнини, като за 5 от случаите в разработения за целта програмен продукт автоматично се анализира не една, а цяла фамилия линии от посочения вид и се определя най-неблагоприятната по отношение на коефициента на устойчивост.

В настоящата разработка случайният характер на величините, от които зависи коефициентът на устойчивост, се отчита с прилагане на Метода Монте-Карло. Методиката за неговото прилагане е описана в точка 3.2.3.

3.2.2. Постановка на задачата за намиране на коефициента на устойчивост

Стъпка 1. Построява се повърхнината на плъзгане.

Един възможен подход за определяне формата и местоположението на хлъзгателната повърхнина в еднороден масив произлиза от основни положения в теорията на граничното равновесие на сипещата се среда.

Съгласно тази теория елементарните площадки на плъзгане в еднороден масив може да възникнат при минимална стойност на главното напрежение σ_1 , равна на временното съпротивление на скалите на едноосов натиск σ_H [3, 7, 62]

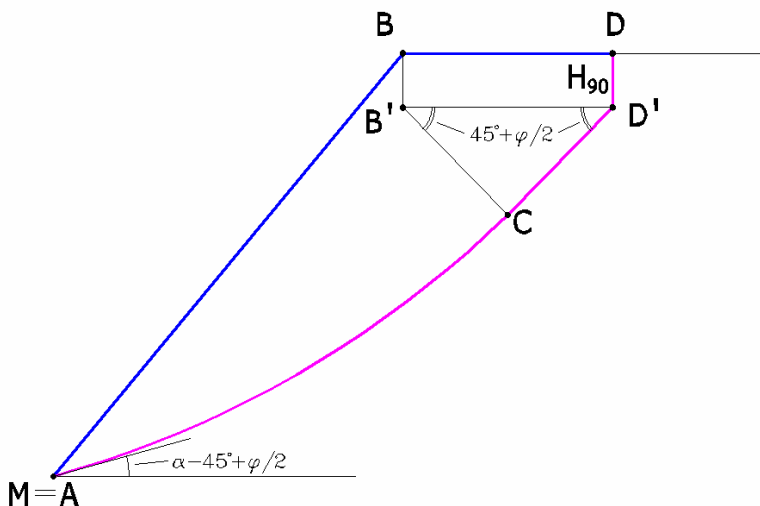
$$\sigma_1 = \sigma_H = 2c \cot g \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

където φ и c са съответно ъгълът на вътрешно триене и кохезията на скалите. Максималната дълбочина на възникване на елементарни площадки H_{90} , т.е. вертикалната дебелина на слоя, в който действа напрежението σ_1 е

$$(3.2.2)$$

площадка на откоса под ъгъл $\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$, а на долната - под ъгъл $\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ спрямо

Много често криволинейната част от хлъзгателната повърхнина (**АС** от фигури 3.2.1 и 3.2.2) се представя като дъга от окръжност (Метод на Фисенко). В настоящата разработка освен реализация на метода на Фисенко, се предлагат още 4 варианта за криволинейната част, представени с изразите: $y = ax^2 + bx$, $y = ax^3 + bx$, $y = ax^4 + bx$ и $y = ae^{bx}$.



ФИГ. 3.2.4.

Да приемем условно петата на откоса в началото на координатната система, т.е. точка A ще има координати $A(0,0)$. При определени височина и ъгъл на откоса еднозначно се определят координатите на точки B и B' , а именно $B\left(\frac{H}{tg\alpha}, H\right)$ и $B'\left(\frac{H}{tg\alpha}, H - H_{90}\right)$.

Нека криволинейната част **AC** се представя с уравнението $y=F(x)$ и нека точка **C** има следните координати: $C(C_x, C_y)$, където засега C_x и C_y са неизвестни.

Както беше споменато по-горе:

- допирателната към дъгата **AC** в точка **C** ще има ъглов коефициент $tg(45^\circ + \varphi/2)$, т.е.

$$F'(C_x)=tg(45^\circ+\phi/2) \quad (3.2.3)$$

- допирателната в точка A ще има ъглов коефициент $\operatorname{tg}(\alpha - 45^\circ + \varphi/2)$, т.е.

$$F'(0)=tg(\alpha-45^{\circ}+\varphi/2) \quad (3.2.4)$$

- Точка C лежи на права, минаваща през точка B' с ъглов коефициент $tq(180 - (45^\circ + \varphi/2)) = -tq(45^\circ + \varphi/2)$, следователно

$$C_y - (H - H_{q0}) = -tg(45^\circ + \phi/2)(C_y - H/tga) \quad (3.2.5)$$

- Точка C лежи и на криволинейната част, т.е.

$$C_y = F(C_x) \quad (3.2.6)$$

Ако зададем конкретен израз за функцията $y=F(x)$ с два параметъра a и b , т.е.

$y=F(a, b, x)$, то уравнения (3.2.3), (3.2.4), (3.2.5) и (3.2.6) формират система от четири уравнения с четири неизвестни a, b, C_x и C_y , след чието решаване еднозначно се получава както хлъзгателната повърхнина, така и координатите на точка C , а оттам и координатите на точки D' и D . В таблици 3.2.1 и 3.2.2 са дадени получените стойности за тези величини при четири конкретни израза за функцията $y=F(x)$. За компактност на израза са използвани означенията: $K_1=tg(\alpha-45^\circ+\varphi/2)$ и $K_2=tg(45^\circ+\varphi/2)$. За пълнота да отбележим и координатите на останалите две точки: D и D' , а именно $D\left(2C_x-\frac{H}{tg\alpha}, H\right)$ и $D'\left(2C_x-\frac{H}{tg\alpha}, H-H_{90}\right)$.

Таблица 3.2.1.

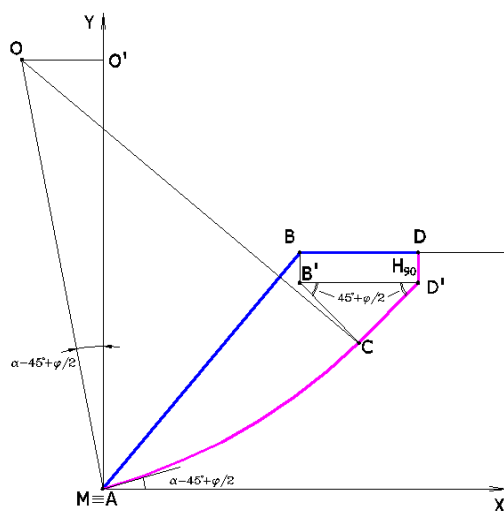
Вид крива	C_x	C_y
$y = a x^2 + b x$	$\frac{2[H(K_2 ctg \alpha + 1) - H_{90}]}{3K_2 + K_1}$	$\frac{k_1 + k_2}{2} C_x$
$y = a x^3 + b x$	$\frac{3[H(K_2 ctg \alpha + 1) - H_{90}]}{2(2K_2 + K_1)}$	$\frac{C_x}{3}(K_2 + 2K_1)$
$y = a x^4 + b x$	$\frac{4[H(K_2 ctg \alpha + 1) - H_{90}]}{5K_2 + 3K_1}$	$\frac{C_x}{4}(K_2 + 3K_1)$
$y = a e^{bx}$	$\frac{H(K_2 ctg \alpha + 1) - H_{90}}{\frac{K_2 - K_1}{\ln(K_2 / K_1)} + K_2}$	$\frac{K_2}{\ln(K_2 / K_1)} C_x$

Таблица 3.2.2.

Вид крива	Първа производна на y	a	b
$y = a x^2 + b x$	$y' = 2a x + b$	$(K_2 - K_1)/(2C_x)$	K_1
$y = a x^3 + b x$	$y' = 3a x^2 + b$	$(K_2 - K_1)/3C_x^2$	K_1
$y = a x^4 + b x$	$y' = 4a x^3 + b$	$(K_2 - K_1)/4C_x^2$	K_1
$y = a e^{bx}$	$y' = a b e^{bx}$	K_1 / b	$(\ln(k_2 / k_1))/C_x$

В случай, че криволинейната част AC се представя с дъга от окръжност (метод на Фисенко), то ако R и $O(O_x, O_y)$ са съответно радиусът и центърът на тази дъга, по аналогия на системата уравнения (3.2.3), (3.2.4), (3.2.5) и (3.2.6) може да се състави система от пет уравнения с пет неизвестни R, O_x, O_y, C_x, C_y (Фиг. 3.2.5), а именно:

$$\begin{cases}
 (C_x - O_x)^2 + (C_y - O_y)^2 = R^2 \\
 O_x / O_y = K_1 \\
 (C_x - O_x) / (C_y - O_y) = -K_2 \\
 H - H_{90} - C_y = K_2 (C_x - H / tg \alpha) \\
 O_x = R \sin(\alpha - 45^\circ + \varphi / 2)
 \end{cases} \quad (3.2.7)$$

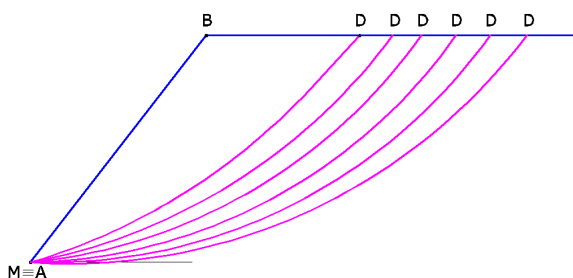


Първото уравнение от горната система се получава от условието, че точка $C(C_x, C_y)$ лежи на дъга от окръжност с център $O(O_x, O_y)$ и радиус R . Второто уравнение е следствие от факта, че отсечка **OA** е перпендикулярна на допирателната на дъгата в точка A , аналогично третото уравнение е поради факта, че отсечка **OC** е перпендикулярна на допирателната на дъгата в точка C . Четвъртото уравнение е по същество уравнение (3.2.5), а чрез петото уравнение е изразена дължината на отсечката **OO'** от правоъгълния триъгълник **AO'O**. След решение на горната система за радиуса R се получава [63]

$$\begin{aligned} R &= -\frac{Q}{P} + \sqrt{\left(\frac{Q}{P}\right)^2 - \frac{V^2}{P}}, \quad \text{където} \\ Q &= V[N(K_2 - 1/K_1) - K_2^2 W] \\ P &= N[N(K_2 - 1/K_1) - 2WK_2^2(K_2 - 1/K_1)] + K_2^2 - 1 \\ N &= \sin(\alpha - 45^\circ + \varphi/2) \\ V &= H(K_2 \cot g \alpha + 1) - H_{90} \\ W &= (1 + K_2^2)^{-0.5} \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

Тъй като в практиката не винаги се наблюдават линейни участъци по хлъзгателната повърхнина (такива примери има и в мини „Марица Изток”), то в настоящата разработка се предлага и възможност за търсене на най-неблагоприятната хлъзгателна повърхнина измежду 5 фамилии линии от втора или трета степен, а именно: дъга от окръжност и части от параболи, описани със следните аналитични изрази: $y=ax^2$, $y=ax^3$, $y=ax^2+b$ и $y=ax^2+bx+c$.

Една дъга от окръжност се определя от 3 точки. В горните четири изрази има от един до три коефициента, което означава, че за определянето им трябва да фиксираме по една точка от съответната крива за всеки коефициент. В настоящата разработка това е направено по следния начин.



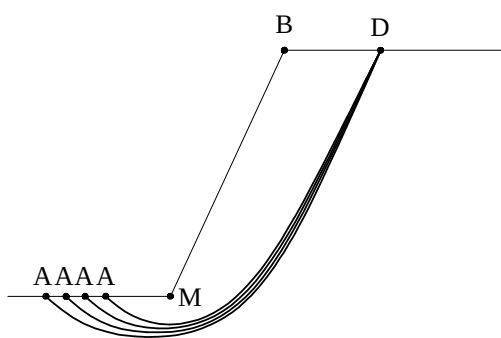
Да вземем най-простата крива – тази с уравнение $y = ax^2$ (фиг. 3.2.6). За определеност приемаме началото на координатната система в петата на откоса (точка M). Очевидно кривата минава през началото на координатната система.

Ако са ни известни координатите на точка D (точката, в която кривата пресича горната площадка на стъпалото), то можем да определим коефициента a в уравнението (в таблица 3.2.3 на края на тази точка са дадени стойностите на коефициентите, участващи в изразите за хлъзгателните повърхнини). В случая приемаме някакво начално положение за

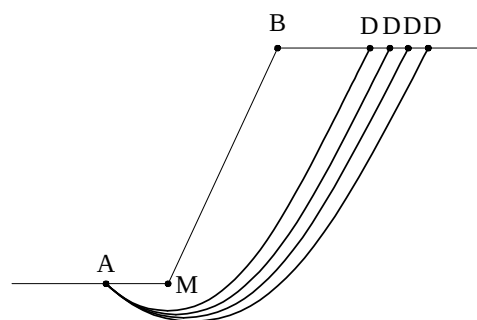
точка D (напр. от технологични съображения абсцисата на точка D да бъде поне с 3 метра по-голяма от абсцисата на точка B). Това е едно възможно положение на хлъзгателната повърхнина от този вид. За така определената хлъзгателна повърхнина се определя коефициентът на устойчивост. След това „плъзгаме“ точка D по горната площадка на стъпалото със стъпка напр. 1 метър. Така за хлъзгателната повърхнина се получава цяла фамилия линии от вида $y=ax^2$ и за всяка линия от фамилията се изчислява коефициентът на устойчивост. Възниква въпросът: кога да спре въпросното плъзгане? Тъй като при отдалечаването на точка D от горния ръб на откоса на стъпалото първоначално коефициентът на устойчивост намалява, но от определен момент нататък започва да расте, то в момента, в който се установи тенденцията на нарастване, плъзгането спира и се фиксира онова положение на хлъзгателната повърхнина, при което се е получила най-ниска стойност на коефициента на устойчивост. Първоначалното положение на точка D се определя от потребителя чрез задаване на разстоянието w между точките D и B , като се предлага подразбираща се стойност 3 метра.

Подходът при кривата с уравнение $y=ax^3$ е същият.

В случая на хлъзгателна повърхнина от вида $y=ax^2+b$ се извършва независимо едно от друго „плъзгане“ на две точки A и D (фиг. 3.2.7.а и 3.2.7.б). Потребителят определя началните им положения чрез въвеждане на стойности за w - разстояние между точките D и B и p - разстояние между точките A и M .



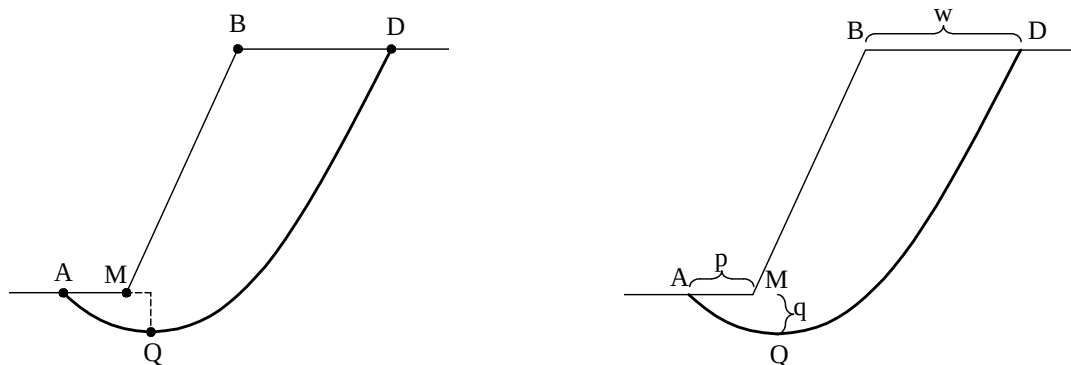
фиг. 3.2.7.а



фиг. 3.2.7.б

Подразбиращите се стойности за w и p са съответно 3 и 1 метър.

За намиране на коефициентите a , b и c в израза за кривата $y=ax^2+bx+c$ се определят три точки A , D и Q , които се плъзгат независимо една от друга (фиг. 3.2.8). Точка Q е върхът на параболата. Точките A и D се плъзгат съответно по долната и горната площадка на стъпалото със стъпка 1 метър, както е показано на фигури 3.2.7.а и 3.2.7.б. Точка Q се плъзга вертикално със стъпка q - напр. половин метър.

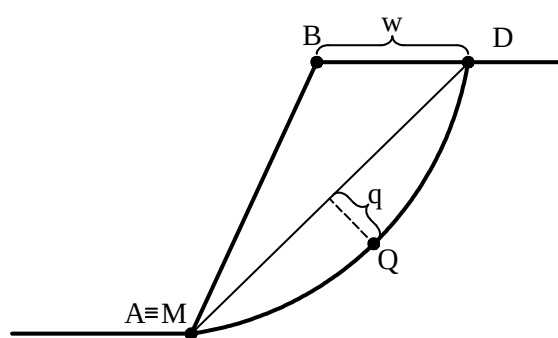


Фиг. 3.2.8.

Първоначалните положения на тези точки се определят от потребителя чрез въвеждане на стойности на w , p и q . Подразбиращите се стойности на тези променливи са съответно 3, 1 и половин метър.

Таблица 3.2.3.

Вид крива	Стойности за коефициентите в израза за y
$y = ax^2$	$a = \frac{H}{[H/\operatorname{tg}\alpha + w]^2}$
$y = ax^3$	$a = \frac{H}{[H/\operatorname{tg}\alpha + w]^3}$
$y = ax^2 + b$	$a = \frac{H}{[H/\operatorname{tg}\alpha + w]^2 - p^2}, \quad b = -ap^2$
$y = ax^2 + bx + c$	$a = \frac{H + 2q + 2\sqrt{q^2 + qH}}{(H/\operatorname{tg}\alpha + p + w)^2}, \quad b = -a(H/\operatorname{tg}\alpha + p + w) + \frac{H}{(H/\operatorname{tg}\alpha + p + w)},$ $c = \frac{b^2}{4a} - q$



Фиг. 3.2.9.

В случая, когато хлъзгателната повърхнина е дъга от окръжност, пак са необходими три точки за нейното определяне (фиг. 3.2.9). В настоящата разработка тези три точки са крайните и средната точка на дъгата, съответно точки A , D и Q . Точките D и Q се плъзгат независимо една от друга, като точката D се плъзга по горната площадка на стъпалото със стъпка w - напр. 1 метър, а точка Q се плъзга по направление, перпендикулярно на хордата AD със стъпка q - напр. половин метър.

Първоначалните положения на тези точки се определят от потребителя чрез въвеждане на стойности на w и q . Подразбиращите се стойности на тези променливи са съответно 3 и половин метър.

За да се доопредели дъгата, е необходимо да се намери нейният радиус R и центърът ѝ - точка $O(O_x, O_y)$. Както е известно

$$R = \frac{d^2 + 4w^2}{8w}, \quad (3.2.9)$$

където d е дължината на прилежащата хорда, т.е.

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{(H \cot g\alpha + w)^2 + H^2} \quad (3.2.10)$$

Координатите на точка $O(O_x, O_y)$ могат да се определят чрез решаване на системата уравнения

$$\begin{cases} O_x^2 + O_y^2 = R^2 \\ 2O_y = H - \frac{H \cot g\alpha + w}{H} \left(O_x - \frac{H}{\operatorname{tg}\alpha} - w \right) \end{cases} \quad (3.2.11)$$

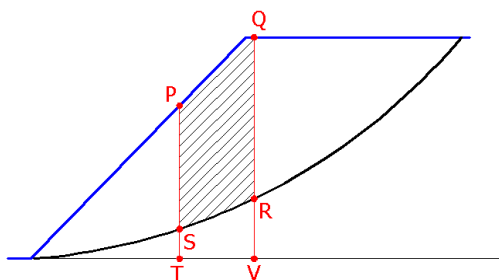
Първото уравнение от горната система се получава от условието, че дъгата минава през точка A , която сме приели за начало на координатната система. Второто уравнение е следствие от факта, че центърът на дъгата лежи на права, перпендикулярна на отсечка AD и минава през средата ѝ. Тази система има две решения. Избираме онова, за което $O_y > 0$.

Стъпка 2.

Призмата на възможното обрушване (зоната, заключена между хлъзгателната повърхнина и повърхнината на откоса) се разделя по вертикала на N на брой ламели.

За i – тата ламела ($i = 1, 2, \dots, N$) се определя:

- S_i [m^2] - площта на ламелата;
- P_i [t] - тегло на ламелата;
- α_i [$^\circ$] - ъгъл на допирателната към линията на плъзгане в центъра на основата на ламелата;
- $N_i = P_i \cos \alpha_i$ и $T_i = P_i \sin \alpha_i$, които представляват съответно нормалните и тангенциалните сили, действащи по повърхнината на свличане;
- L [m] - дължината от хлъзгателната повърхнина.



Фиг. 3.2.10

За по-точни изчисления, при пресмятане на площите на ламелите са използвани определени интегрални. Става въпрос за намиране на лицето на заштрихованата площ от фиг. 3.2.10. Това лице представлява разлика между лицето на многоъгълника $TVQP$ и лицето на криволинейния трапец $TVRS$. За лице на многоъгълник има известна формула, а лицето на криволинейния трапец може да се пресметне като определен интеграл от T до V с подинтегрална функция – израз за хлъзгателната повърхнина.

В частния случай когато хлъзгателната повърхнина е дъга от окръжност, не е необходимо да се работи с интегрални, а се ползват формулите за лице на отрез от окръжност. В Приложение № 1 са изведени стойностите на определените интегрални, използвани при пресмятане площите на ламелите за разглежданите в настоящата разработка варианти на хлъзгателна повърхнина.

Дължината на хлъзгателната повърхнина също е пресмятана посредством определен интеграл. Тъй като в някои случаи този интеграл не се пресмята точно, е прилаган Методът на Симпсън за числено пресмятане на интегрални. В Приложение № 2 са описани определените интегрални, използвани при пресмятане дължината на криволинейната част от хлъзгателната повърхнина.

За намиране на ъгъла α_i се пресмята първата производна на функцията, представяща хлъзгателната повърхнина, в средата на основата на съответната ламела.

При компютърна реализация на различни методи в повечето случаи аналитичната форма е за предпочитане. Ето защо в настоящата разработка са изведени аналитични зависимости за намиране на всички елементи, участващи в пресмятане на коефициента на устойчивост по формула (3.2.1) за различни случаи на хлъзгателна повърхнина. Аналитичната форма е за предпочитане и от друга гледна точка. Ако се направи компютърна реализация напр. на Метода на Фисенко в оригиналния му графоаналитичен вид, то при детерминирана схема биха се извършвали 215 операции. За реализацията на същия метод, но представен чисто аналитично, както е описано в точка 3.2.2 на настоящата разработка, са необходими само 31 операции. Това намаляване на броя на операциите още по-осезателно би се усетило когато Метода на Фисенко се проиграе вероятно с Метод Монте-Карло.

3.2.3. Вероятностен подход за намиране на коефициента на устойчивост

Когато величините, участващи в пресмятане на коефициента на устойчивост по формула (3.2.1), се разглеждат като детерминирани, то и самият модел е детерминиран. Тогава за конкретни стойности на $H, \alpha, \gamma, \phi, c$ се получава и определена стойност за

коефициента на устойчивост η . Но наблюденията показват, че в действителност особено величините γ, φ, c имат ясно изразена вероятностна природа и се характеризират не с една стойност, а със съответен вероятностен закон. На практика, за конкретни условия, за всяка от тези величини има натрупани определен брой стойности, които представляват статистическите им закони на разпределение. В такъв случай коефициентът на устойчивост η , представлява случайна величина и моделът вече е стохастичен.

Ето защо, за пълното отчитане на наличната информация, най-подходящи за изследване са статистическите методи. За целта в настоящата разработка се използва методът Монте-Карло [6, 8] и подходът е следният:

Стъпка 1.

На база на зададения статистически закон на разпределение на всяка от величините $H, \alpha, \gamma, \varphi, c$ се построява нейната кумулативна функция. Така че се получават пет такива функции, да ги означим съответно $F_1(m), F_2(m), F_3(m), F_4(m), F_5(m)$, т.е. $F_1(m)$ е кумулативната функция на случайната величина H , ..., $F_5(m)$ е кумулативната функция на случайната величина c .

Стъпка 2.

С подходящ генератор на случайни числа се генерират последователно пет случайни числа $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5$. Може да се счита, че те са стойности на равномерно разпределена в интервала $[0, 1)$ случайна величина. Да означим с $F_i^{-1}(n)$ обратната функция на $F_i(m)$. Пресмятат се петте стойности $F_i^{-1}(\xi_i)$, като по този начин се получава една възможна петорка от стойности на величините $H, \alpha, \gamma, \varphi, c$, участващи в пресмятането на коефициента на устойчивост.

Стъпка 3.

С така намерените стойности за $H, \alpha, \gamma, \varphi, c$ по алгоритъма от предходния параграф се намира една стойност за коефициента на устойчивост η , да я означим с η_1 .

Стъпки 2 и 3 се изпълняват многократно (N на брой пъти), като N е поне четирицифрено число (правени са изчисления и при $N=100000$), в резултат на което се получават N на брой стойности за коефициента на устойчивост: $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N$. Въз основа на Закона за големите числа може да се приеме, че стойността

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \dots + \eta_N}{N}$$

е една достатъчно точна оценка на коефициента на устойчивост.

Прилагането на Метода Монте-Карло освен, че ни дава по-адекватна оценка на изчислявания параметър (в случая коефициента на устойчивост), дава и възможност за получаване на допълнителни характеристики като дисперсия, доверителни интервали, оценка на вероятността за устойчивост, респективно риска от свличане.

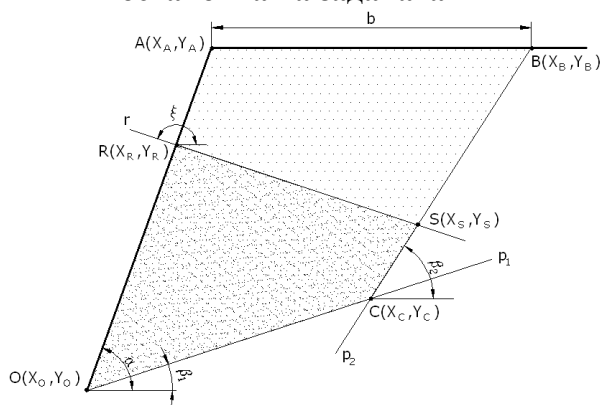
Изложените в тази точка алгоритми са реализирани в разработения от автора програмен продукт SlopeStabBG, описан в 4.2.1.

3.3. Вероятностен модел за оценка устойчивостта на открито стъпало в случай на система от пукнатини, формиращи хлъзгателната повърхнина

В повечето разработки се задава конкретен аналитичен израз за повърхнината на плъзгане. Когато има система от пукнатини, което е природна даденост, задаването на определен аналитичен израз за хлъзгателната повърхнина деформира модела и го отдалечава от действителността, тъй като траекторията на хлъзгане ще се формира от пукнатините.

Настоящата разработка предлага вероятностен подход за решение на този проблем при две системи пукнатини.

Постановка на задачата



Фиг. 3.3.1

Да разгледаме откос с технологични параметри: ъгъл α и височина H (фиг. 3.3.1). Предполагаме, че откосът се състои от не повече от 2 литоложки разновидности. Разбира се, откосът може да бъде и еднороден. На този етап представяме разделителната линия r между отделните пластовете като права, зададена с точка и ъгъл спрямо хоризонта (точка R и ъгъл ξ на чертежа).

По-точно, потребителят въвежда само ординатата на точката R , а абсцисата ѝ се изчислява програмно така, че точката да лежи на линията на откоса. Правите p_1 и p_2 дефинират двете системи пукнатини. В този случай хлъзгателната повърхнина представлява начупената линия OCB .

Естествено, в основата на изчислителната схема пак стои формула (3.2.1).

Разделяме масива $OACB$ с вертикални прави на n на брой равни части (ламели), т.е. следваме *Стъпка 2* от точка 3.2.2, при което за всяка ламела с индекс i , $i = 1, 2, \dots, n$ трябва да се пресметне:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \operatorname{tg} \varphi_i P_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^n c_i l_i}{\sum_{i=1}^n P_i \sin \alpha_i}, \quad (3.3.1)$$

където:

- P_i [t] е теглото на ламелата;
- α_i [°] - ъгъл на наклона на линията на плъзгане в основата на ламелата;
- φ_i [°] - ъгъл на вътрешно триене на съответната разновидност в основата на ламелата;
- c_i [t/m²] – кохезия на съответната разновидност в основата на ламелата;
- l_i [m] – дължината на линията на плъзгане на ламелата.

За да се намери теглото P_i на i -та ламела е необходимо предварително да се намери лицето ѝ, при това с отчитане на отделните литоложки разновидности. Ако в една ламела има и от двете разновидности, то трябва поотделно да се намерят лицата на парченцата от ламелата, попадащи във всяка една от разновидностите. Тогава

$$P_i = S_i^1 \gamma_1 + S_i^2 \gamma_2, \quad (3.3.2)$$

където S_i^k е площта на частта от i -тата ламела, попадаща в литоложка разновидност k с обемно тегло γ_k , $k=1, 2, \dots$

При разделяне на масива на ламели, в общия случай се получават три вида фигури:

- триъгълници;
- четириъгълници или по-конкретно трапеци;
- петоъгълници.

Това предполага да може да се смятат лицата на тези три вида фигури. Би могло да се използва добре познатата формула за лице на произволен многоъгълник по зададени координати на върховете му, но в случая фигурите са елементарни и може лицата да се смятат по следния начин: за триъгълниците – полупроизведението от основа и височина към нея, за трапеците – произведението от височината и полусбора от основите им, а

петоъгълниците, които се получават в тази задача, могат да се декомпозират на 2 трапеца. И при трапеците, и при триъгълниците височината h представлява ширината на ламелата и е равна на:

$$h = \frac{H \cot g\alpha + b}{n}, \quad (3.3.3)$$

където b е разстоянието между точките A (горният ръб на откоса) и B (точка от площадката на стъпалото, където излиза пукнатината p_2), както е показано на фиг. 3.3.1.

Остава да определим дължините на основите на триъгълниците и трапеците. Масивът $OACB$ се разделя на ламели посредством вертикални прави. Да означим с:

- P_i - пресечните точки на вертикалните прави с хлъзгателната повърхнина;
- Q_i - пресечните точки на вертикалните прави с линията на откоса;
- V_i - пресечните точки на вертикалните прави с разделителната линия g ;

Необходимо е да се намерят координатите на точките P_i , Q_i и V_i , $i=1, 2, \dots, n$. Ако приемем условно $P_0 \equiv O(0, 0)$, то:

$$X_{P_i} = X_{Q_i} = X_{V_i} = X_{P_{i-1}} + h \quad (3.3.4)$$

за всяко $i=1, 2, \dots, n$.

По-интересно е пресмятането на ординатите на тези точки, което става по следния начин:

$$Y_{P_i} = \begin{cases} tg\beta_1 X_{P_i}, & \text{при } X_{P_i} \leq X_C \\ Y_B + tg\beta_2 (X_{P_i} - X_B), & \text{при } X_{P_i} > X_C \end{cases} \quad (3.3.5)$$

$$Y_{Q_i} = \begin{cases} tg\alpha X_{P_i}, & \text{при } X_{P_i} \leq X_A \\ H, & \text{при } X_{P_i} \geq X_A \end{cases} \quad (3.3.6)$$

$$Y_{V_i} = Y_R + tg\xi (X_{P_i} - X_R) \quad (3.3.7)$$

Да отбележим, че формула (3.3.5) ще се изпълнява, т.е. ще имаме точки V_i само когато X_{P_i} отговаря на условието $X_R \leq X_{P_i} \leq X_S$.

След като са пресметнати координатите на точките P_i , Q_i и V_i , $i=1, 2, \dots, n$, няма проблем да се пресметнат дължините на основите на триъгълниците и трапеците. За целта се използва формулата за разстояние между две точки

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.3.8)$$

където (x_i, y_i) , $i=1, 2$ са координатите на двете точки.

От величините, участващи в изчисляването на коефициента на устойчивост, остава да се укаже как се определят α_i и l_i , $i=1, 2, \dots, n$. Ако означим с $|P_{i-1} P_i|$ разстоянието между точките P_{i-1} и P_i , то

$$l_i = \begin{cases} |P_{i-1} C| + |C P_i| & \text{при } X_{P_{i-1}} < X_C < X_{P_i} \\ |P_{i-1} P_i| & \text{във всички останали случаи} \end{cases} \quad (3.3.9)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} \beta_1 & \text{при } (X_{P_{i-1}} + X_{P_i}) / 2 < X_C \\ \beta_2 & \text{във всички останали случаи} \end{cases} \quad (3.3.10)$$

За да се отчете по-пълно изменчивостта на природната среда и да се построи модел, по-близък до реалността, приемаме, че якостните характеристики γ_i, ϕ_i, c_i , $i=1, 2$ на двете разновидности, както и величините $H, b, \alpha, \beta_1, \beta_2, \xi$ са случайни. Всички те се изменят в известни граници по съответни вероятностни закони. След което се следват стъпките, описани в точка 3.2.3, т.е. прилага се Метода Монте-Карло, при което се получава

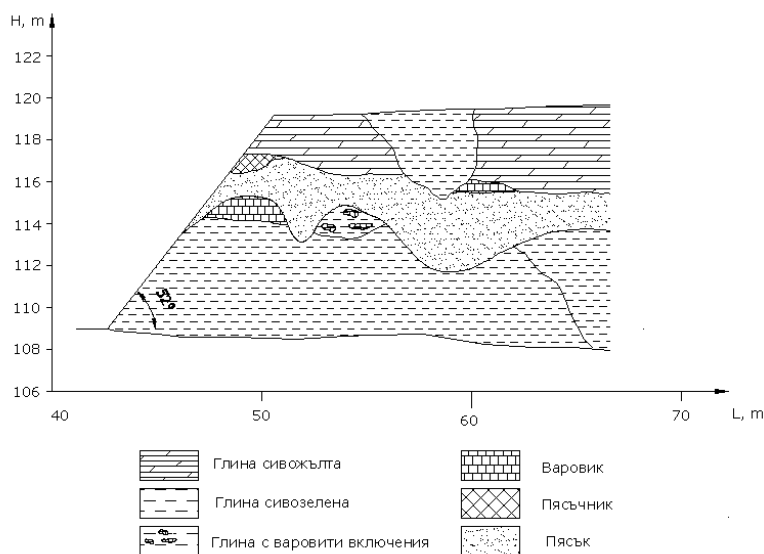
съвкупност от стойности, посредством която може да се построи статистическият закон на разпределение на η и да се получат редица числови характеристики, включително и оценка на вероятността за устойчивост на откос и съответно риска в масива да настъпят свлачищни процеси.

Така представената процедура е реализирана програмно в среда на Visual Studio 2008. Диалогът с програмата е описан в точка 4.2.2.

Предложената схема твърде добре описва реални срещани ситуации при наличие на две системи пукнатини. Получените резултати са в съответствие с извършени наблюдения на движението на откоси. Обобщение на тази задача за по-голям брой литоложки разновидности, при това с произволна геометрия от една страна и със сложна хлъзгателна повърхнина – от друга, е представено в точка 3.4.

3.4. Вероятностен модел за оценка устойчивостта на нееднородно стъпало (при произволно зададена хлъзгателна повърхнина и при хлъзгателна повърхнина, зададена с определен аналитичен израз)

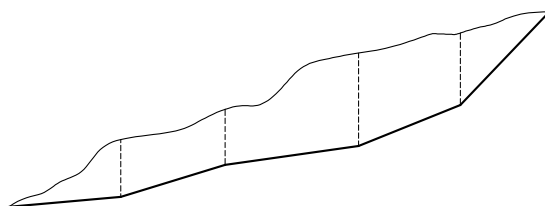
Освен еднородни, в практиката се срещат и многослойни откоси. Дори даден откос по същество да е еднороден, в него могат да се появят на определени места включения с други якостни характеристики. В настоящия параграф се прави вероятностен модел за изчисляване коефициента на устойчивост на откос, в който се наблюдават произволен брой литоложки разновидности. Не се поставят ограничения върху геометрията на границите между различните разновидности (фиг. 3.4.1).



Фиг. 3.4.1.

Повърхнината на плъзгане се избира измежду 3 варианта криви от втора и трета степен (дъга от окръжност и части от параболи, представени аналитично чрез изразите $y=ax^2$ и $y=ax^3$). Това са част от кривите, които се предлагат и при работа с еднороден откос (точка 3.2.). В точка 3.2.2 е описано как точно в настоящата разработка се определя дъгата от окръжността и коефициентите от уравненията на кривите. Освен това е предвидена и възможност за използване на сложна хлъзгателна повърхнина, зададена като **произволна начупена линия**. Когато върховете на тази начупена линия са 2, получаваме частен случай на праволинейна хлъзгателна повърхнина. Друг частен случай на такъв тип хлъзгателна повърхнина е задачата от предходния параграф (хлъзгателна повърхнина с два линейни участъка или математически казано – начупена линия с три върха) и т.н. В разработеното за задачата програмно осигуряване тази хлъзгателна повърхнина е наречена „**Потребителска**“. Начупената линия, представяща тази именно хлъзгателна повърхнина, се генерира (изчертава) от потребителя на база на негова експертна оценка за геологията и структурната

нарушеност на масива. Това е особено полезно при решаване на задачи за скални откоси, както е показано на фиг. 3.4.2.



Фиг.3.4.2

Постановката и решението на задачата принципно е както за еднороден откос с тази разлика, че се променя начинът на изчисляване на елементите, участващи във формулата за изчисляване на коефициента на устойчивост, която придобива вида:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(\sum_{j=1}^{m_i} S_j \gamma_j \operatorname{tg} \varphi_j \right) \cos \alpha_i \right) + \sum_{j=1}^k c_j l_j}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (3.4.1)$$

където:

- n е брой на ламелите, на които се разделя площта, ограничена от контура на откоса и повърхнината на плъзгане;
- k - брой на частите, на които хлъзгателната повърхнина се разделя от различните литоложки разновидности;
- m_i – брой части, на които i -тата ламела е разделена от отделните литоложки разновидности;
- $\sum_{i=1}^n \left(\left(\sum_{j=1}^{m_i} S_j \gamma_j \operatorname{tg} \varphi_j \right) \cos \alpha_i \right)$ - сумата от силите на триене, задържащи откоса;
- $\sum_{j=1}^k c_j l_j$ - сумата от силите на кохезията, задържащи откоса;
- $\sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n P_i \sin \alpha_i$ е сумата от тангенциалните сили, движещи откоса;
- P_i е теглото на ламелата;
- α_i - ъгъл на наклона на допирателната към повърхнината на плъзгане в средата на основата на ламелата;
- φ_j – ъгъла на вътрешно триене за съответната литоложка разновидност в ламелата;
- S_j - лице на част от ламелата, попадаща в дадена литоложка разновидност;
- c_j – кохезия на съответната разновидност по хлъзгателната повърхнина;
- l_j – дължината на линията на плъзгане от дадена разновидност.

Описаният в тази точка алгоритъм е реализиран програмно и работи в среда на продукти на Autodesk, напр. AutoCAD. Потребителският диалог е описан в точка 4.2.3. До голяма степен изборът на програмната среда е обусловен от следните съображения:

- въвеждането на графична информация в текстов режим (напр. САМО покоординатно) е много неудобно и е предпоставка за грешки;
- желателно е да има средства за редактиране на въведената векторна графична информация, което предполага някаква CAD-система;
- AutoCAD или някакъв друг продукт на Autodesk е внедрен и широко се използва в рудниците в България, поради което има възможност за автоматизирано въвеждане на част от необходимата входна информация, напр.

контура на стъпалото, границите между различните скални разновидности и донякъде специфичната потребителска хлъзгателна повърхнина.

По същество разработеното от автора програмно осигуряване за тази задача представлява множество от допълнителни команди в AutoCAD, обособени в самостоятелно меню "ОТКОС" и лента с инструменти (Toolbar) със същото име, чрез които в интерактивен режим се изчертава повърхнината на плъзгане и се изчислява коефициентът на устойчивост по следния алгоритъм:

1. Изчертава се контура на стъпалото, границите на литоложките разновидности и евентуално „потребителската“ хлъзгателна повърхнина.
2. Въвежда се необходимата входна информация. За разлика от случая на еднороден откос, тук не се въвежда височината и ъгъла на откоса, тъй като те се получават директно от графиката. Предвидено е якостните параметри на отделните литоложки разновидности да могат да се задават чрез вариационни редове.
3. В случай, че якостните параметри са зададени вероятно, се намират кумулативните им функции и се прилага Метод Монте-Карло по отношение на детерминираната изчислителна схема от точка 4. В противен случай директно се минава към точка 4.
4. Площта, ограничена от контура на стъпалото и хлъзгателната повърхнина, се разделя с вертикални прави на n на брой равни части (ламели) и за всяка ламела с индекс i , $i = 1, 2, \dots, n$ трябва да се пресметне:
 - m_i – брой части, на които ламелата е разделена от отделните литоложки разновидности;
 - $S_1, S_2, \dots, S_{m_i}$ – лицата на отделните части на ламелата, попадащи в различни литоложки разновидности;
 - P_i – теглото на ламелата, което е равно на $\sum_{j=1}^{m_i} S_j \gamma_j$, където $\gamma_j, j = 1, \dots, m_i$ е обемната плътност на съответната литоложка разновидност;
 - α_i – ъгъл на наклона на допирателната към повърхнината на плъзгане в средата на основата на ламелата;

Това е достатъчно за намиране на сумата от силите на триене

$\sum_{i=1}^n \left(\left(\sum_{j=1}^{m_i} S_j \gamma_j \operatorname{tg} \varphi_j \right) \cos \alpha_i \right)$, задържащи откоса и сумата от тангенциалните сили

$\sum_{i=1}^n T_i$, движещи откоса. За намиране на сумата от силите на кохезията,

задържащи откоса, първо се намира броят k на частите, на които хлъзгателната повърхнина се разделя от различните литоложки разновидности, както и дължината $l_j, j = 1, \dots, k$ на всяка от тези части. Сега вече всички елементи, участващи във формула (3.4.1) са определени и може да се изчисли коефициента на устойчивост η .

В случай, че са въведени необходимите данни и е приложен Метод Монте-Карло като крайни резултати освен осреднена стойност за коефициента на устойчивост се дава и оценка на вероятността за устойчивост на откоса (съответно риска от свличане).

3.5. Определяне устойчивостта на откоси с отчитане влиянието на динамични въздействия

В редица случаи откосите изпитват динамични въздействия, характерът на които зависи от източника, предизвикващ колебанията. Източник на вибрационни въздействия в

откритите рудници могат да бъдат ГТЛ, подвижният ж. п. състав, роторните багери при работа и движение, но най-големи са стойностите на тези въздействия при взривни работи (ВР). Трябва да се отбележи, че при ВР максималните по стойност динамични натоварвания се получават за кратко време, докато при другите източници това динамично въздействие е или динамично повтарящо се (напр. при влаковете), или непрекъснато (при ГТЛ).

Изследвания на екип от научни работници от МГУ под ръководството на проф. Ст. Трендафилов за влиянието на динамичните въздействия в условията на откритите рудници на мини „Марица-Изток” [64] показват следното:

- най-интензивни скорости на трептения, но на малки разстояния (5 до 10 метра) се създават от булдозера. Тези трептения, обаче, бързо затихват и на разстояние 10-20 метра от източника спадат до безопасно ниво;
- вторите по големина скорости на трептене се създават от движението на влак. Вибрациите имат значително разпространение и до 30-40 метра не показват тенденция на затихване. Поради близост на честотния диапазон на тези вибрации със собствената честота на масива, съществува опасност от резонансни явления;
- роторните багери при нормален режим на работа създават безопасни скорости на трептене при единично въздействие върху масива с преобладаваща вертикална компонента;
- верижните багери създават скорости на трептене също в границите на допустимите за единично въздействие, но с преобладаваща хоризонтална компонента;

Оценката на устойчивостта на откосите в случай на динамични въздействия се извършва главно в две направления:

- промяна на стойностите на използваните якостни показатели;
- корекция в използваните изчислителни схеми чрез въвеждане в тях на т.н. сеизмични сили без изменение на якостните показатели на литоложките разновидности

Вторият подход, т.е. използването на методи, които отчитат пряко въздействието на динамичното натоварване върху устойчивостта на откосите под формата на допълнителна сеизмична сила е свързано с определянето на показатели, които се явяват функция на координати в пространството. Тъй като плъзгателната повърхнина не е определена (в изключение на редки случаи), а само „вероятна”, то определянето на посочените координати, а оттам и необходимите параметри, е свързано с редица условности. По тази причина в повечето случаи е по-подходящо отчитането на динамичните въздействия да стане чрез коригиране на стойностите на якостните показатели [64], и по-точно стойностите на кохезията и ъгъла на вътрешно триене.

Някои автори предлагат [64] ъгълът на вътрешно триене да се намали по формулата:

$$\varphi_s = \varphi - \arctg K_s$$

където:

- φ_s [°] е ъгълът на вътрешно триене при динамични въздействия;
- K_s - коефициент на сеизмично натоварване.

Илов в [65] предлага следната таблица за намаляване с $\Delta\varphi$ на стойностите на ъгъла на вътрешно триене φ при вертикален земетръс.

φ [°]	25	30	35	40
φ_s [°]	22.0-18.80	26.5-22.8	31.2-27.1	36.0-31.5
$\Delta\varphi$ [°]	3.0-6.2	3.5-7.2	3.8-7.9	4.0-8.5

При динамично въздействие енергията на източника на колебания привежда в движение частиците на масива. Вследствие на това с течение на времето намалява съпротивлението на срязване. В [64] е представено изследване на 80 броя земни проби, обособени в 2 партии според различното им естествено водно съдържание. Изследванията са показали, че при допустимо напрежение на срязване стойността на кохезията в динамичен режим е намаляла с 13% в първата и с 27% във втората партида в сравнение със съответните стойности в статичен режим (първата партида е включвала проби с по-ниско естествено водно съдържание). Аналогичните изследвания, но при максимално напрежение на срязване показват намаляване на кохезията съответно с 15% за първата и 18% за втората партида.

Якостни показатели	Ненарушено състояние				Нарушено състояние					
	Максимални		Допустими		Максимални		Гранични		Допустими	
	Стат.	Дин.	Стат.	Дин.	Стат.	Дин.	Стат.	Дин.	Стат.	Дин.
Първа партида										
c_H	1,6	1,38	0,7	0,6	0,41	0,38	0,35	0,34	0,21	0,19
φ_H	24,5	22	14	10,5	15,5	15	13	12	9,5	9
Втора партида										
c_H	1,2	0,98	0,66	0,48	0,27	0,2	0,2	0,17	0,09	-
φ_H	14,5	13	10	8,5	10	8,5	8,5	6	5,5	-
$c_{изч.}$	0,69	0,81	0,54	0,4	0,13	0,09	0,12	0,08	-	
$\varphi_{изч.}$	8	7	7,5	6,5	7	4,3	5	4	-	

От казаното дотук е видно, че за адекватното отразяване на динамичните натоварвания при изчисляване устойчивостта на откосите е необходимо да бъдат снети характеристиките на динамичните въздействия върху откоса и те да бъдат моделирани по подходящ начин въз основа на резултатите от изпитанията.

В разработеното програмно осигуряване е предвидено отчитане на динамичните въздействия чрез въвеждане на корекция за кохезията и ъгъла на вътрешно триене.

Глава 4. Описание на разработеното програмно осигуряване. Сравнителен анализ с готови системи

Разработването на специализиран минен софтуер през последните тридесет години бележи сериозно развитие. В света са разработени и се предлагат над 1000 програмни системи, предназначени за решаване на редица задачи в областта на минното производство.

4.1. Описание на готови продукти за изчисляване коефициент на устойчивост

Направен е кратък анализ на възможностите, които предлагат 3 готови програмни продукта за оценка устойчивостта на открито съпало: **Slope, Slide 5.0, PRIZMA**.

Независимо, че програмата Slope облекчава в значителна степен изчисленията, свързани с оценката на устойчивостта на откосите, тя притежава следните недостатъци:

- ръчно въвеждане на данните от геоложките сондажи, което при разнородни откоси и голям брой данни затруднява работата;
- оценката на устойчивостта на откосите се извършва с детерминирани стойности за характеристиките на масива;
- липсва възможност за избор на изчислителен метод;
- липсва информация за броя на изследваните вероятностни повърхнини;

- висока цена – над 4500 \$ за един лицензиран модул без допълнителни функции.

SLIDE е професионален продукт с богата функционалност и би могъл да намери приложение в много случаи. Като недостатък може да се посочат недостатъчно гъвкавите му възможности за въвеждане на векторната графична информация: или покоординатно в текстов режим, или чрез обменни чертожни файлове на Autodesk, с много строги изисквания за структурата на файловете. Освен това продуктът не дава възможност за вероятностна оценка на устойчивостта, респективно риска от свличане. И естествено, както на повечето професионални комерсиални продукти, цената му е висока.

Програма „PRIZMA” е разработена от екип от Минно-геоложкия университет, начело с проф. П. Златанов и доц. Г. Трапов в края на миналия век в среда DOS и естествено работи в конзолен режим. Независимо от това, тя успешно се ползва и в наши дни. Програмата дава възможност за изчисляване на коефициента на устойчивост за:

- еднослоен откос по 6 вида хлъзгателни повърхнини;
- многослоен откос за 2 вида хлъзгателни повърхнини при хоризонтално залягащи пластове.

И в двата си варианта програмата дава възможност за изграждане и проиграване на вероятностен модел на откоса. По принцип резултатите могат да се отпечатват и на принтер. Необходимо е да се отбележи, че резултатите от създаденото от автора на настоящата разработка програмно осигуряване, в частта си, която като функционалност покрива програмата „PRIZMA”, дава резултати, идентични с тези на „PRIZMA”.

4.2. Описание на разработеното програмно осигуряване

4.2.1. Програма SlopeStabBG за изчисляване на коефициент на устойчивост на еднородни откоси

Програмата е разработена в среда на Microsoft Visual Studio 2008. След стартиране на програмата се появява прозореца от фиг. 4.2.1.

Изчисляване коефициент на устойчивост

Технологични параметри

Височина на откоса: 14.0 [Чети]
 Ъгъл на откоса: 50 [Чети]
 Вид на хлъзг. повърхнина: Парабола
 Брой опити: 10000

Физични свойства и якостни показатели

Обемно тегло: 1.84 [Чети]
 Ъгъл на вътр. триене: 6.08 [Чети]
 Кохезия: 4.40 [Чети]

Коефициент на устойчивост

Изчисли

Средна стойност: 1.024230999

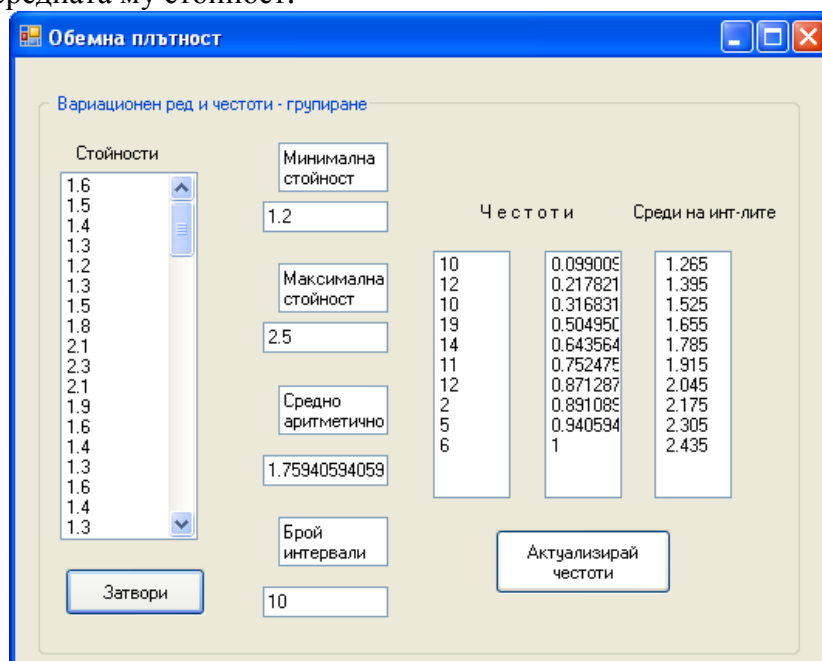
Вероятност за устойчивост на откоса: 53.66%

Вариационен ред (отгоре надолу):
 .85488608543242
 .91479798549047
 1.1004689491706
 1.0647524485746
 .91526406985247
 1.0493506989723
 .92910964549207
 .97401966827208
 .89118716238959

Фиг. 4.2.1.

В горната половина на прозореца се задават стойностите за технологичните параметри на стъпалото и физичните и якостните показатели. Предвидено е те да могат да се задават и като детерминирани величини (стойността им се въвежда в съответното текстово поле), и вероятно, в случай, че някой от входните параметри се представя с вариационен ред, т.е. приема се за случаен. Тогава трябва да се избере предвиденият за него бутон „Чети”, след

което системата дава възможност на потребителя да избере файла, съдържащ натрупаните за въпросния параметър множество стойности. След прочитане на файла се намира кумулативната функция за този параметър, с която функция се работи по-нататък в програмата и се визуализира прозореца от фиг. 4.2.2. В този прозорец при избран от програмата брой на интервалите на групиране са показани: минималната, максималната и средноаритметичната стойност за съответния показател, относителните и натрупаните честоти, както и средите на интервалите на групиране. Потребителят има възможност да промени броя на интервалите, като зададе нова стойност в полето „Брой интервали“, след което задължително трябва да се избере бутона „Актуализирай честоти“, за да се актуализира кумулативната функция за въпросния параметър, респективно да се актуализират стойностите в списъчните полета за честотите и средите на интервалите. Броят на интервалите трябва да се избере така, че да няма интервал, който не съдържа стойност на параметъра. При това броят на интервалите е желателно да бъде повече от 5. За приключване на тази процедура се избира бутон „Затвори“ и програмата връща потребителя в основния прозорец от фиг. 4.2.1 и в текстовото поле на параметъра (вляво от съответния бутон „Чети“) се визуализира средната му стойност.



Фиг. 4.2.2.

Изборът на вида на повърхнината на плъзгане се извършва от списъчното поле в горния ляв ъгъл на прозореца. Предвидени са 10 варианта (фиг. 4.2.3.) за хлъзгателна повърхнина, описани в точка 3.2.

Стойността в полето „Брой опити“ се взема предвид само ако поне един от параметрите $H, \alpha, c, \phi, \gamma$ е зададен вероятностно.

Ако коректно е въведена цялата необходима входна информация, при избор на бутон „Изчисли“ в долната половина на прозореца се визуализират получените резултати, а именно:

- в списъчното поле са поместени всичките (според зададения брой опити) получени стойности за коефициента на устойчивост;
- средноаритметичната стойност на коефициента на устойчивост;
- вероятността за устойчивост на откоса в %.

В случай на липса на стойност или некоректна стойност (напр. отрицателна височина) излиза съобщение за липсващи или респективно некоректни данни.

След получаване на резултатите програмата запазва първоначално въведената входна информация и потребителят може да повтори изчисленията като въведе само различните спрямо предходното изпълнение входни данни (напр. за същите стойности за

технологичните параметри и якостните показатели на масива но при друг вид на хлъзгателната повърхнина).

4.2.2. Програма за изчисляване на коефициент на устойчивост при система от две пукнатини

Тази програма реализира алгоритъма, описан в точка 3.3 и също е разработена в среда на Visual Studio 2008. След стартиране на програмата се появява прозореца от фиг. 4.2.3.

В левия панел на прозореца се въвежда необходимата входна информация. По подразбиране се приема еднороден откос. В случай, че има две литоложки разновидности, потребителят трябва да избере чек-бокса „Втора разновидност”, при което се разрешават групите контроли „Литоложка разновидност 2” и „Разделителна линия”. Тогава може да се определи разделителната линия, както и якостните характеристики и на втората разновидност.

Фиг. 4.2.3.

За всяка от входните величини $H, \alpha, c, \varphi, \gamma$ има предвидени по два начина за въвеждане, които са представени чрез две контроли: текстово поле и команден бутон с надпис „Чети”.

Тези начини съответстват на двата подхода за тълкуване на съответната величина: детерминиран и вероятностен. В случай, че дадена величина се приема за детерминирана, то нейната единствена стойност се въвежда в предвиденото за нея текстово поле. Ако някой от входните параметри се представя с вариационен ред, т.е. приема се за случаен, трябва да се избере предвиденият за него бутон „Чети”, при което се отваря нов прозорец, в който е необходимо да се определи текстов файл, съдържащ натрупаните за въпросния параметър множество стойности. След това се визуализира прозореца от фиг. 4.2.2, който служи за намиране на кумулативната функция за избрания параметър, с която функция се работи по-нататък в програмата. В текстовото поле на параметъра (вляво от съответния бутон „Чети”) се визуализира средната му стойност (аналогично на диалога, описан в точка 4.2.1.).

При избор на бутон „Изчисли” отново се прави проверка за пълнота и коректност на входната информация. Ако резултатът от проверката е положителен, в десния панел на прозореца се визуализират получените за коефициента на устойчивост оценки. Естествено чрез бутон „Край” се приключва работата с програмата. На фиг. 4.2.4. е представен прозорец от изпълнението на програмата с примерни данни.

Определяне коефициент на устойчивост на откос

Литоложка разновидност 1

Обемно тегло: 2.2 Чети

Ъгъл на вътр. триене: 34.75 Чети

Кохезия: 0.82 Чети

Коефициент на устойчивост

Средна стойност: 1.176930133140

Средно-квадратично отклонение: 0.01808

☒ Втора разновидност

Брой опити: 5000

Разделителна линия

У на точка B: 13.2 Чети

Ъгъл: 110.2 Чети

Литоложка разновидност 2

Обемно тегло: 2.01 Чети

Ъгъл на вътр. триене: 32.25 Чети

Кохезия: 0.88 Чети

Пунктатни

Първа пунктатна, ъгъл: 32.3 Чети

Втора пунктатна, ъгъл: 75.1 Чети

b: 7.27 Чети

Вероятност за устойчивост на откоса: 0.9884

Технологични параметри

Височина на откоса: 18.34 Чети

Ъгъл на откоса: 69.2 Чети

Изчисли

Край

Фиг. 4.2.4.

4.2.3. Програмен модул за изчисляване на коефициент на устойчивост за многослоен откос

Този модул по същество представлява съвкупност от допълнителни команди в AutoCAD, обособени в самостоятелно меню "OTKOS" и лента с инструменти (Toolbar) със същото име. Разработен е на Visual Lisp и Visual Basic for Application с използване на DCL (Dialog Control Language) за визуалните прозорци на Lisp.

За използването на функциите от модула е необходимо предварително чрез стандартните команди на AutoCAD да бъдат изчертани контурите на откоса и границите на литоложките разновидности. Ако ще се работи с потребителска хлъзгателна повърхнина, трябва да е очертан и нейният контур. Всички споменати контури могат да са произволни линии. Единственото условие е те да са обекти от тип LWPOLYLINE, т.е. олекотени полилинии от гледна точка на AutoCAD. Не е необходимо потребителят да ги затваря, но контурите им трябва да са очертани така, че да може програмно да се затвори всяка от зоните на отделните литоложки разновидности. Не е необходимо специална послоечна организация, т.е. отделните полилинии могат да бъдат в произволни слоеве (Layers). Не е необходимо контурът на всяка литоложка разновидност да бъде ЕДНА ЗАТВОРЕНА начупена линия, каквито са изискванията в програма Slide, тъй като това са предпоставки за грешки, особено при съседни литоложки разновидности. Освен това се получава и дублиране на информация. Тъй като е предвидена и възможност за вероятностен подход, то ако са налице необходимите данни, последните трябва предварително да са въведени в текстови файлове. След тази предварителна подготовка може да се използват функциите от меню "OTKOS", а именно:

SetMat - команда за определяне на якостните параметри на всяка от срещаните в стъпалото литоложки разновидности. След стартиране на командата се визуализира прозореца от фиг. 4.2.5. Командата трябва да се стартира поне толкова пъти, колкото различни литоложки разновидности се срещат в стъпалото. При първото ѝ стартиране списъчното поле е празно. Командата не може да завърши успешно без да са попълнени всички текстови полета с изключение евентуално на поле „Наименование“. Стойностите за обемното тегло, ъгъла на вътрешно триене и кохезията се въвеждат по същия начин, както и в програма SlopeStabBG. По този начин диалогът с потребителя във всички модули от разработеното в рамките на дисертационния труд програмно осигуряване е унифициран. Освен якостните показатели, потребителят трябва да въведе и наименованието и псевдонима за съответната разновидност. Полето псевдоним е задължително и служи за идентифициране

на литоложката разновидност. Въведената в него информация (до 10 символа, много често под формата на абревиатура) се показва в списъчното поле в дясната част на прозореца и се появява в последствие в команда **Lith**. При желание въведената информация може да се съхрани във външен файл посредством бутона „Съхрани“. Респективно ако в предходен сеанс е въведена информация за дадена литоложка разновидност, то тази информация може да се зареди чрез бутон „Зареди“.

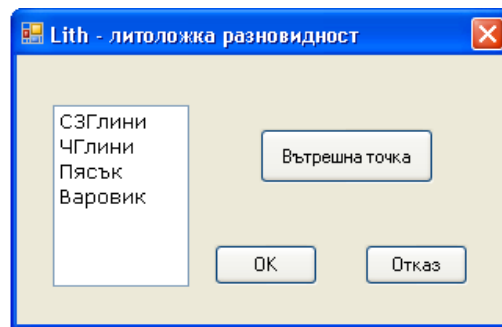
Фиг. 4.2.5

Както се вижда, предвидени са и двата подхода: детерминиран и вероятностен. Ако вече има въведена информация за дадена литоложка разновидност, то при следващо стартиране на командата в списъчното поле (дясната част на прозореца) се изписват псевдонимите на всички литоложки разновидности, за които вече има въведена информация в текущия сеанс. Ако в този момент се маркира елемент от списъчното поле, то в съответните полета за обемно тегло, ъгъл на вътрешно триене, кохезия, наименование и псевдоним се изписват въведените стойности за избраната разновидност и потребителят има възможност да ги редактира. Стойността в полето „Брой опити“ се взема предвид само в случай, че поне един параметър за поне една литоложка разновидност е зададен с вариационен ред. В този случай системата използва стойността за „Брой опити“, въведена при последното изпълнение на команда **SetMat**.

Lith - генерира един затворен контур като граница на литоложка разновидност и определя „материал“ за нея, т.е. чрез избора на псевдонима на литоложката разновидност, въведен предварително с команда **SetMat**, потребителят фактически определя якостните параметри на съответната литоложка разновидност. По принцип командите **SetMat** и **Lith** биха могли да се обединят в една, но е предпочетен вариантът с две команди, тъй като е възможно да има повече от една зона от дадена литоложка разновидност и да не се повтаря диалога с въвеждане на якостните характеристики. Командата визуализира диалогов прозорец, в който от списъчно поле се избира „материала“, а чрез бутон „Вътрешна точка“ се въвежда вътрешна за областта точка фиг. 4.2.6. В момента на избора на бутон „Вътрешна точка“ основният прозорец се скрива, за да може потребителят да въведе точката, след което се възстановява автоматично.

За правилната работа на командата е необходимо:

- На екрана да има начертани обекти от тип LWPOLYLINE, които да ограждат площта за съответната литоложка разновидност;
- Предварително да е въведена информацията за якостните параметри на отделните литоложки разновидности посредством команда **SetMat**;



Фиг. 4.2.6.

StepEdge – предоставя възможност на потребителя за въвеждане контура на стъпалото, което трябва предварително да е изчертано.

SlideSurf – команда за избор на вида на хлъзгателната повърхнина. В зависимост от избрания вид е необходимо да се въведе доуточняваща информация от вида:

- при произволна „Потребителска“ хлъзгателна повърхнина е необходимо да я посочи посредством бутон „Посочи“. Необходимо е тази линия да има с контура на стъпалото ТОЧНО ДВЕ общи точки. Системата веднага намира зоната, ограничена отгоре от стъпалото, а отдолу - от хлъзгателната повърхнина, временно я щрихова и извежда въпрос за потвърждение. При отговор „N“ всичко въведено в текущата команда се игнорира.;
- при хлъзгателна повърхнина от вида $y=ax^2$ и $y=ax^3$ е необходимо да се въведе разстоянието w , между „плъзгащата“ се точка D и ръба на стъпалото, както е описано в точка е 3.2.2

Calculate – команда за намиране на коефициента на устойчивост според зададената с предходните четири команди входна информация.

4.3. Съпоставка между разработения софтуер и някои от готовите програми

Целта на сравнителния анализ е да се разбере и оцени приложимостта на разработения софтуер за оценка устойчивостта на откоси, съпоставен с резултатите от готови програмни продукти, както и да се идентифицират областите за неговото приложение и необходимостта от надграждане (или усъвършенстване) му.

В таблици 4.3.1 са представени получените резултати за коефициента на устойчивост за три примера на открито работно стъпало, а именно:

- Работно стъпало, изградено от синьозелени глини за условията на Източномаришкия възлищен басейн при следните данни: височина на стъпалото $H=14$ m; ъгъл на откоса на стъпалото $\alpha=52^\circ$, обемно тегло $\gamma=2,0$ t/m³, кохезия $c=7,4$ t/m² и ъгъл на вътрешно триене $\varphi=8^\circ$ и кръговоцилиндрична форма на плъзгателната повърхнина;
- Работно стъпало, изградено от синьозелени глини със същите якостни характеристики, но при произволна форма на хлъзгателната повърхнина;
- Неоднородно стъпало с твърди включения (примерът, показан на фиг.3.4.1.) при произволна хлъзгателна повърхнина (същата както за втория пример).

Направените изчисления за коефициента на устойчивост на работно открито стъпало с помощта на програмите Slope, Slide 5.0 и разработения от автора на настоящата разработка програмен продукт показват съизмерими стойности. В случая на еднородно стъпало и кръговоцилиндрична повърхнина разликите в получените стойности се дължат на различните начини, по които се конструира хлъзгателната повърхнина. В програмата Slide 5.0 се изисква потребителят да определи правоъгълна зона, в която с определена стъпка се генерират точки, представляващи центрове на дъги за хлъзгателни повърхнини. От така определената фамилия хлъзгателни повърхнини се избира онази, при която коефициентът на устойчивост е най-малък. Естествено, това не гарантира, че няма друга хлъзгателна

повърхнина, чийто център не попада в така определената зона, за която хлъзгателна повърхнина се получава по-малък коефициент на устойчивост.

Таблица 4.3.1

Софтуерен продукт / изчислителен метод		Еднородно стъпало, изградено от синьо-зелени глинни при кръговоцилиндрична форма на плъзгателната повърхнина	Еднородно стъпало, изградено от синьо-зелени глинни при произволна форма на плъзгателната повърхнина	Разнороден масив при произволна форма на плъзгателната повърхнина
Slide 5.0	Ordinary / Fellenius	2,366	2,515	6,091
	Bishop Simplified	2,363	2,447	5,497
	Janbu Simplified	2,449	2,479	6,057
	Janbu Corrected	2,594	2,621	6,404
	Lowe-Karafiath	2,466	2,541	6,033
Slope		1,726		
SlopeStabBG		1,713897	2,31415	
Модул „ОТКОС” в AutoCAD				5,255913

Независимо от това разликата в стойностите за коефициента на устойчивост със Slide 5.0 и настоящия разработен софтуер варира от 5,4 до 11,7% за еднороден откос и съответно от 4,4 до 17,9% за нееднороден масив е в границите на допустимото. Като се има предвид, че получените стойности за коефициента на устойчивост с разработения продукт са по-ниски, то от гледна точка на сигурността това може да се отчете като предимство.

Разработената от автора на дисертацията програма SlopeStabBG за оценка на устойчивостта на еднородни откоси, освен че дава идентични резултати с тези на програма „PRIZMA”, но и като функционалност я покрива.

Разработеният продукт за оценка на устойчивостта на многослоен откос позволява на потребителя сам да изчертае профила или да ползва готов геоложки профил без да са му необходими допълнителни познания в AutoCad среда. Няма ограничения по отношения на броя на литоложките разновидности, както и на реда на тяхното изобразяване.

Голяма част от изброените по-горе недостатъци на готовите програмни продукти са взети предвид при разработването на настоящия софтуер за оценка на устойчивостта на откоси, което му дава своите предимства, изразяващи се в:

- 1) Удобно и облекчено използване от страна на потребителя, без да са необходими допълнителни познания в областта на програмирането, Autodesk среда и т.н.
- 2) Възможности за въвеждане не само на детерминирани стойности на входните данни, но и въвеждането на вариационни редове (т.е. отчитане на вероятностния характер на една, няколко или всички величини, участващи в изчисленията).
- 3) Възможности за оценка на устойчивостта на откоси при различни форми на потенциалната плъзгателна повърхнина, които могат да бъдат избрани от потребителя в зависимост от използвания разработен софтуер SlopeStabBG в случай на еднородно стъпало, в случай на система пукнатини или в случай на произволно задавана от потребителя плъзгателна повърхнина.

На този етап разработеният софтуерен продукт е представен във вид удобен за ползване без да е търсена визуализация за комерсиални цели.

Заклучение. Основни резултати и приноси

Формулирана е задача за изчисляване устойчивостта на открито стъпало при специфичните условия на най-големия обект за открито разработване на въглища у нас. За

успешното ѝ решаване са проучени задълбочено и са взети предвид:

- спецификата на теренните условия с оглед реализиране на принципно възможни подходи;
- методи за пресмятане на устойчивостта в подобни пластични среди;
- вероятностния характер на процесите и явленията в природата, както и на свойствата на природната среда и на технологичните фактори;
- функционалните възможности на разпространени комерсиални програмни продукти в областта на оценка устойчивостта на откоси;
- натрупаният в МГУ опит от специалисти, занимавали се продължително време с решаване на този тип задачи.

Основни резултати и приноси

Основните резултати и научно приложни приноси в представения труд се отнасят до оценка устойчивостта на откоси в откривни стъпала.

Постигнатите резултати се състоят в:

1. Пренасяне и прилагане на известни методи от областта на математиката и информатиката, които са подходящи за решаване на конкретни проблеми от практиката на открития добив.
2. Доказана и разширена е приложимостта на имитационното моделиране за вземане на рационални управленски решения в областта на оценка устойчивостта на откривно стъпало.
3. Създадени и изследвани са вероятностни модели за оценка устойчивостта на:
 - еднородно стъпало при съвместното изменение на физичните свойства, якостните показатели и технологичните параметри;
 - откривно стъпало в случай на система от пукнатини, формиращи хлъзгателната повърхнина;
 - нееднородно стъпало при произволно зададена хлъзгателна повърхнина и при хлъзгателна повърхнина, зададена с определен аналитичен израз;
 - откривни стъпала с отчитане влиянието на динамични въздействия.
4. Анализирани са слабостите на проучените програмни продукти за оценка на устойчивостта на откривно стъпало (затворени среди, ограничена възможност за критичен анализ на използваните методи; предимно детерминирано решение; висока цена).
5. Обобщени са детерминирани методи чрез разширяване, доразвиване и допълване с възможност за вероятностно описание на съществуващите условия.
6. Разработен е аналитичен апарат, заместващ графоаналитичния подход, използван в повечето изчислителните схеми за определяне устойчивостта на откривно стъпало.

Постигнатите резултати дават основание за формулиране на следните авторски претенции за **приноси**:

1. Изследването, анализът и оптимизирането на цялостния процес за решаване на задачата за оценка устойчивостта на откривни стъпала е извършено чрез пренос и прилагане на адекватни съвременни методи от математиката и информатиката.
2. За решаването на важни за практиката проблеми са разработени оригинални програми чрез проучване, използване, адаптиране и конструиране на съответни алгоритми.
3. Разработен е формулен апарат за бързо построяване на хлъзгателната повърхнина, в резултат на което се съкращава времето за получаване на крайните резултати.
4. Направена е оценка на риска от свличане чрез използване на вероятностен подход при решаване на задачите за устойчивостта на откривно стъпало.
5. В съвкупността от програми, разработени в рамките на дисертационния труд, съществува модул, който е оригинално авторско постижение и решава задачата за

оценка на устойчивостта на откривно стъпало в общия случай при произволни:

- брой и геометрия на литоложките разновидности;
- вид и форма на хлъзгателна повърхнина.

Насоки за бъдещи изследвания

1. Разширяване на набора от хлъзгателни повърхнини и методи, приложими и при скални откоси.
2. Графично визуализиране на получените резултати
3. Добавяне към разработеното програмно осигуряване на елементи, присъщи на комерсиалните програми, като вградена „помощ” (Help), инсталираща процедура, подсказващи текстове (ToolTipTexts) и др.

Публикации на автора, свързани с дисертацията

Христов Ст., Я. Евтимов, Г. Койчев, М. Трифонова, Цв. Фильов, Осигуряване устойчивостта на борда при изземване на рудата и откривката на североизточната част на рудник „Кремиковци”, VII Национална маркшайдерска конференция с международно участие, Златни пясъци, 19-25 юни 2000г.

Трифонова М., Нов подход за избор на изчислителна схема при оценка устойчивостта на откоси, Год. на МГУ „Св. Ив. Рилски”, т. 55, св. II, София, 2012.

Александрова Е., М. Трифонова, Оценка устойчивостта на откоси с отчитане на риска, Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив, 25-26.X.2012г.

Приложение № 1

Пресмятане на определените интеграли, използвани при изчисляване площите на ламелите за различни варианти на хлъзгателна повърхнина

1. Хлъзгателна повърхнина от вида $y=ax^2+bx$

$$E = \int_u^v (ax^2 + bx) dx = \int_u^v ax^2 dx + \int_u^v bx dx = \frac{ax^3}{3} \Big|_u^v + \frac{bx^2}{2} \Big|_u^v = \frac{av^3}{3} - \frac{au^3}{3} + \frac{bv^2}{2} - \frac{bu^2}{2}$$

2. Хлъзгателна повърхнина от вида $y=ax^3+bx$

$$E = \int_u^v (ax^3 + bx) dx = \int_u^v ax^3 dx + \int_u^v bx dx = \frac{ax^4}{4} \Big|_u^v + \frac{bx^2}{2} \Big|_u^v = \frac{av^4}{4} - \frac{au^4}{4} + \frac{bv^2}{2} - \frac{bu^2}{2}$$

3. Хлъзгателна повърхнина от вида $y=ax^4+bx$

$$E = \int_u^v (ax^4 + bx) dx = \int_u^v ax^4 dx + \int_u^v bx dx = \frac{ax^5}{5} \Big|_u^v + \frac{bx^2}{2} \Big|_u^v = \frac{av^5}{5} - \frac{au^5}{5} + \frac{bv^2}{2} - \frac{bu^2}{2}$$

4. Хлъзгателна повърхнина от вида $y=ae^{bx}$

$$E = \int_u^v ae^{bx} dx = \frac{a}{b} \int_u^v e^{bx} d(bx) = \frac{a}{b} e^{bx} \Big|_u^v = \frac{a}{b} (e^{bv} - e^{bu})$$

5. Хлъзгателна повърхнина от вида $y=ax^2$

$$E = \int_u^v ax^2 dx = \frac{av^3}{3} - \frac{au^3}{3}$$

6. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ax^2 + b$

$$E = \int_u^v (ax^2 + b) dx = \int_u^v ax^2 dx + \int_u^v b dx = \frac{av^3}{3} - \frac{au^3}{3} + b(v - u)$$

7. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ax^3$

$$E = \int_u^v ax^3 dx = \frac{av^4}{4} - \frac{au^4}{4}$$

8. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ax^2 + bx + c$

$$E = \int_u^v (ax^2 + bx + c) dx = \int_u^v ax^2 dx + \int_u^v bx dx + \int_u^v c dx = \frac{av^3}{3} - \frac{au^3}{3} + \frac{bv^2}{2} - \frac{bu^2}{2} + c(v - u)$$

Приложение № 2

Пресмятане на определените интеграли, използвани при изчисляване дължината на криволинейната част от хлъзгателната повърхнина

1. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ax^2 + bx$, $y' = 2ax + b$

$$L = \int_u^v \sqrt{1 + b^2 + 4abx + 4a^2x^2} dx - \text{пресмята се числено по Метода на Симпсън}$$

2. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ax^3 + bx$, $y' = 3ax^2 + b$

$$L = \int_u^v \sqrt{1 + b^2 + 6abx^2 + 9a^2x^4} dx - \text{пресмята се числено по Метода на Симпсън}$$

3. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ax^4 + bx$, $y' = 4ax^3 + b$

$$L = \int_u^v \sqrt{1 + b^2 + 8abx^3 + 16a^2x^9} dx - \text{пресмята се числено по Метода на Симпсън}$$

4. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ae^{bx}$, $y' = 4abe^{bx}$

$$L = \int_u^v \sqrt{1 + a^2b^2e^{2bx}} dx - \text{пресмята се числено по Метода на Симпсън}$$

5. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ax^2$, $y' = 2ax$

$$\begin{aligned} L &= \int_u^v \sqrt{1 + (2ax)^2} dx = \frac{1}{2a} \int_u^v \sqrt{1 + (2ax)^2} d(2ax) = \frac{1}{2a} \ln \left| 2ax + \sqrt{1 + (2ax)^2} \right| \Big|_u^v = \\ &= \frac{1}{2a} \left[\ln \left| 2av + \sqrt{1 + 4a^2v^2} \right| - \ln \left| 2au + \sqrt{1 + 4a^2u^2} \right| \right] \end{aligned}$$

6. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ax^2 + b$, $y' = 2ax$

Както предходния интеграл

7. Хлъзгателна повърхнина от вида $y=ax^3$, $y'=3ax^2$

$$L = \int_u^v \sqrt{1+(3ax^2)^2} dx - \text{пресмята се числено по Метода на Симпсън}$$

8. Хлъзгателна повърхнина от вида $y = ax^2 + bx + c$, $y' = 2ax + b$

$$\begin{aligned} L &= \int_u^v \sqrt{1+(2ax+b)^2} dx = \frac{1}{2a} \int_u^v \sqrt{1+(2ax+b)^2} d(2ax+b) = \\ &= \frac{1}{2a} \ln \left| 2ax+b + \sqrt{1+(2ax+b)^2} \right| \Big|_u^v = \\ &= \frac{1}{2a} \left[\ln \left| 2av+b + \sqrt{1+(2av+b)^2} \right| - \ln \left| 2au+b + \sqrt{1+(2au+b)^2} \right| \right] \end{aligned}$$

Литература (само цитираната в автореферата според номерацията в дисертацията)

1. Иванов И., П. Гечев., Върху устойчивостта на откосите в откритите рудници на Източномаришкия лигнитен басейн. Тр. върху геолог. на България, серия Инженерна геология и хидрогеология, БАН, кн.4., 1965.
2. Георгиев Г., Развитие на свлачищните процеси в откритите въглищни рудници. Сп. „Въглища”, кн.6., 1972.
3. Христов Ст., Устойчивост и отводняване на откосите, С, 1978.
5. Попов В. Н., П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков, Управление устойчивостью карьерных откосов, М, 2008.
6. Обретенков А., Вероятностни и статистически методи, С, 1978.
7. Стоева П., П. Златанов, Е. Александрова, Устойчивост на откоси и отводняване в открити рудници и кариери, С, 2005.
8. Соболев И. М., Метод Монте-Карло, М., 1972.
9. Георгиев Г. и др. 1981. Методическо ръководство за стабилитетни изчисления на работни, подсипвани и неподсипвани неработни бордове и откоси на насипищата на рудниците от Източномаришкия басейн. С.
10. Ананьев В. П., Потапов А.Д., Инженерная геология. Москва, Высшая школа. 2002.
11. Малюшицкий Ю. Н., Условия устойчивости бортов карьеров. АН УССР, Киев, 1957.
12. Теоретические основы инженерной геологии. Под ред. Е. М. Сергеева, М. 1986.
13. Домтадзе В. Д., Инженерная геология. Недра, 1970.
19. Айтматов И. Т., Э. Г. Газиев и др. Современные проблемы механики скальных пород в энергетическом строительстве. М., Энергоатомиздат, 1986.
20. Кислянков С., Стохастически методи в приложната механика. С., Техника, 1981.
37. Газиев Э. Г., Механика скальных пород в строительстве. М. Стройиздат, 1973
38. Газиев Э. Г., Е. Н. Тиден, Определение параметров систем трещин вероятностным методом. Инженерная геология, 4, 1977
39. Газиев Э. Г., Прогнозирование надежности устойчивости скальных массивов.
40. Газиев Э. Г., Современное состояние инженерной оценки устойчивости скальных откосов. Инженерная геология, 2, 1984
41. Газиев Э. Г., В. И. Речецкий, Вероятностная оценка надежности скальных откосов, М. Стройиздат, 1986
48. Косеков, Ив., Рационални схеми за насипване и методи за повишаване на сигурността на насипищата в рудник „Трояново – 1”. Автореферат на дисертация за присъждане на степен к.т.н. С., 1979
49. Златанов, П. и др., Възможности за приложение на вероятностни методи за оценка устойчивостта на откосите в откритите рудници. Ускорение и ефективно развитие на

въгледобива. Стара Загора, 1880

50. Христов Ст., Учет влияния ошибки при определении устойчивости бортов карьеров. Сб. V Международный симпозиум по маркшейдерскому делу. Варна, т. 4, 1982
53. Халачев Р., Един начин за оценка на устойчивостта на руднични откоси. Минно дело, 2, 1987
54. Халачев Р., Изследване устойчивостта на скални откоси в дълбоките открити рудници с използване на вероятностно-стохастичен подход. Автореферат на дисертация за присъждане на научна степен к.т.н. С., 1987
57. 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 Източно-маришките рудници. Минно дело, 12, 1985
58. Трапов Г., П. Златанов, П. Стоева, Ат. Смилянов, Модел за стабилитетна оценка и съответствие при многослойни насипи и масиви, 2003
59. Стоева П., Г. Трапов, П. Златанов, Оценка на устойчивостта на откоси с отчитане на прекъснатостта на масива, Год. на МГУ, т. 49, Св. II, 2006.
60. Трапов Г., П. Златанов, Оптимизиране устойчивостта на откос по метода на случайното търсене, Год. на МГУ, 2009.
61. Диллон Б., Ч. Сингх, Инженерные методы обеспечения надежности систем, М, „Мир“, 1984
62. Христов Ст., Устойчивост и отводняване на откосите в откритите рудници и кариери, София, 2000.
63. Половов Б. Д., Половова Э. А., Голубко Б. П., Туринцев Ю. И., Аналитический расчет линии скольжения однородного откоса, сб. Проблемы создания автоматизированных систем управления в горной промышленности, Свердловск, 1971.
64. Отчет по договор № 1260 на тема „Определяне на широчината на предпазните площадки в ненарушен и насипищен масив в зависимост от динамичното натоварване за условията на откритите рудници на СО „Марица Изток“, НИС-МГУ
65. Илов Г., Сеизмични товари и сеизмични якостни параметри на почвите при проектиране на фундаменти, укрепителни конструкции и откоси, Строителство, 4/2004.