



## УПРАВЛЕНИЕТО НА СКАЛНИЯ НАТИСК – БАЗОВ ЕЛЕМЕНТ ОТ ГЕОМЕХАНИЧНАТА СЪЩНОСТ НА ПОДЗЕМНО РАЗРАБОТВАНЕ НА РУДНИ НАХОДИЩА

проф. Георги Михайлов, МГУ Св. Ив.Рилски e-mail: mihayg@mgu.bg

### РЕЗЮМЕ

Представена е съвременна концепция на управлението на скалния натиск при подземно разработване на рудни находища и в частност на камерно-стълбовата система. Формирани са четири стъпки, през които трябва да премине изследователският процес.

- Изучаване на структурната нарушеност на масива;
- Въвеждане на вероятностен подход при изследване на напрегнатото и деформирано състояние на масива;
- Отчитане на фактора „време“ при изграждане на блоковия модел на находището (рудника);
- Създаване на База данни и нейното ефективно управление.

Изборът на оптимално решение се основава на устойчивостта на масива. За нейното определяне се предлага използването на отношението на показателите коефициент на циклична носимоспособност (CRR) и коефициент на циклично напрежение (CSR).

**Ключови думи:** структурна нарушеност на масива; коефициент на натоварване на целиците; коефициент на устойчивост; коефициент на циклично напрежение (CSR); коефициент на циклична носимоспособност (SRR).

## THE STOPE DESIGN SUPPORT ASSOCIATED WITH A GEOMECHANICAL ASSESSMENT (FOR UNDERGROUND ORE MINING)

### ABSTRACT

This paper presents a contemporary conception for effective pillar and stope design. To develop a sound understanding intact rock and rock mass strength it must be recognized next four steps (techniques):

- Investigation of rock mass discontinuities;
- Probabilistic approach for assessment strain-stress conditions around each mine openings;
- Block model life – of mine, using time depending factors;
- Data management storage and interpretation.

Analysis criteria are based on mining induced stresses (i.e. type of stability are evaluated).

Each of above aspects are performed on the basis of the real mine practice examples.

A general stope extraction sequence is determined using two available parameters: Cycle Resistance Ratio (CRR) and Cycle Stress Ratio (SSR).

**Keywords:** Rock Mass Discontinuity; Pillar Load Factor; Pillar Stability Factor; Cycle Stress Ratio (SSR); Cycle Resistance Ratio (SRR),

### 1. Въведение

Камерно-стълбовата система (КСС) на разработване е една от най-ефективните добивни технологии. С въвеждане на високо-производителна механизация за пробиване на взривните дупки и сондажи и товаро-транспортни машини за доставка и транспорт на рудата, тя може да се конкурира с технологиите за добив по открит начин. Същевременно въпросът за оразмеряване на целиците не е решен еднозначно. Прилагат се различни изчислителни схеми и хипотези за скалния натиск, което може да се обясни с изключителното разнообразие на природните условия. Най-големият недостатък на тази технология са значителните загуби. В настоящата статия са разгледани три от множеството въпроси, осигуряващи правилното оразмеряване на поддържащите елементи. Без да се претендира,

че това са факторите с най-голяма тежест, тук са разгледани постановки, които започват да се изучават систематично в периода, когато КСС се прилагаше в големи мащаби и най-важното ефективно. Тези постановки са актуални и днес, но вече в условия на съвременни средства за наблюдение, измерване, анализ и контрол.

## 2. Структурна нарушеност на масива

Системното изучаване на структурната нарушеност на масива започва от средата на миналия век, достигайки в днешно време състояние на всеобщо призната дълбочина. Същевременно не бива да се подценява фактът, че първоначално поставените задачи за изучаване на напукаността насочват изследователския процес в различни посоки, често пъти достигайки до взаимно изключващи се резултати. Показателите на механичните свойства, определени в масива и в лабораторни условия съществено се различават и установяването на тази разлика е своеобразен ориентир за качеството на бъдещо проектиране. Един от най-често използваните показатели в моделите за изследване на напрегнатото и деформираното състояние (НДС) около минните изработки е **сцеплението**  $C$ . Установено е, че между сцеплението в масива  $C_m$  и сцеплението, определено в лабораторни условия  $C$  съществува зависимостта [1]:

$$C_m = C_0 + \frac{C - C_0}{1 + a \ln \frac{H}{h}} \quad (1)$$

където  $C$  е сцеплението на монолитни образци в лабораторни условия;

$C_0$  – сцеплението по контактните повърхнини на пукнатините;

$H$  – размерът на обекта, за който се определят свойствата на изследвания масив;

$h$  – средният размер на елементарния структурен блок-средно разстояние между пукнатините;

$a$  – коефициентът, зависещ от якостта на натиск, определена върху образци в лабораторни условия.

Друг показател, намиращ приложение в изчислителните схеми е **модулът на еластичност**  $E$ . Неговото изменение се основава на съществуващата напуканост, характера на запълнението на пукнатините и не на последно място от броя на ситемите пукнатини  $n$ . При  $n \geq 5$  е доказано, че масивът може да се разглежда като квазиизотропен. Във вертикално направление, т.е. в посока на геостатичния товар се използва формулата

$$E_{\perp} = \frac{E}{1 + \sum \eta_i (1 - \sin^4 \theta_i)} \quad (2)$$

където  $E_{\perp}$  е модулът на еластичност във вертикално направление;

$E$  – модулът на еластичност, определен в лабораторни условия;

$\eta_i$  – геометрична характеристика на  $i$ -та система;  $1 \leq i \leq n$ .

От своя страна  $\eta_i$  се определя съгласно израза

$$\eta_i = \frac{\delta_i}{h_i \xi_i}$$

където  $\delta_i$  е средна ширина на разкритието на пукнатините;

$\xi_i$  – относителна площ на скалните контакти;

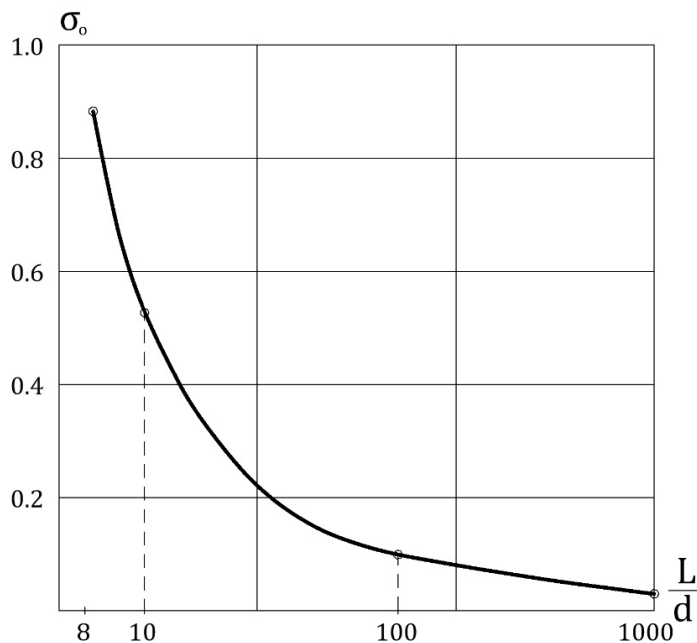
$h_i$  – средно разстояние между контактите т.е. дължина на отворената част на пукнатините;

$\theta_i$  – ъгълът на наклона на  $i$ -та система пукнатини спрямо хоризонталната равнина;

$n$  – броят на системите пукнатини.

По аналогичен начин се извеждат формулите за определяне на модула на еластичност в хоризонтално направление  $E_{\parallel}$ , модулите на срязване  $G_{\perp}$  и  $G_{\parallel}$  коефициентите на Поасон  $\mu_{\perp}$  и  $\mu_{\parallel}$ . Определянето на стойностите на посочените по-горе показатели изискват събиране и обработване (главно по статистически начин) на значително количество информация, което понякога се затруднява от наличието на тектонски, техногенни и допълнително образувани (главно за сметка на скалния натиск) пукнатини. Точността на получените решения значително се повишава при самостоятелно описание и

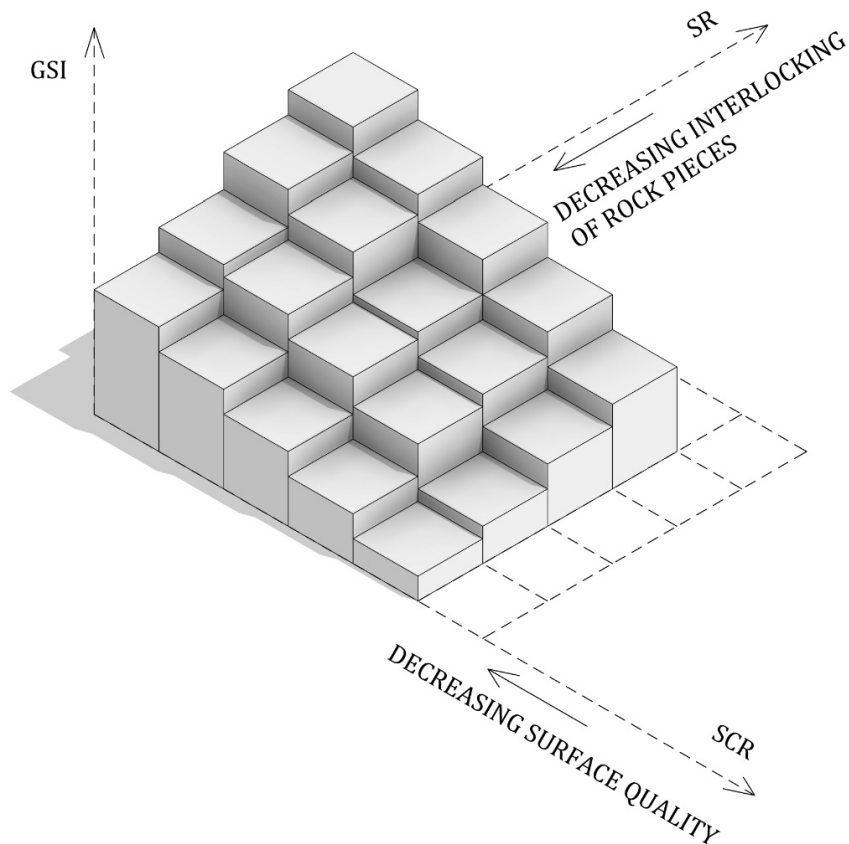
разглеждане на всяка отделна пукнатина. Това е направлението, което най-широко се използва в съвременни условия, благодарение на разработените компютърни системи, респ. **класификационни характеристики** за оценка на качеството на масива: Rock Quality Designation (RQD); Rock Mass Rating (RMR); Modified Rock Mass Rating (MRMR) и др. Те имат отношение както към показателите, характеризиращи структурната нарушеност, така и към оценката на устойчивото състояние на конструктивните елементи на добивната технология. Размерите на тези елементи се изменят в широки граници, което означава, че е налице показател, определящ отношението между линейните им размери  $L$  и размера на елементарния структурен блок, оформен при пресичането на пукнатини от различни системи  $a$ . От друга страна якостните параметри се изменят при различен брой елементарни структурни блокове, съдържащи се в конструктивния елемент. Следователно, може да се търси зависимост между **якостта на масива** и отношението ( $L/a$ ). Тази зависимост е показана на фиг.1. [2].



Фиг.1 Изменение на якостните свойства на скалите в зависимост от отношението между размера на изследвания обект  $L$  и размера на структурния блок  $d$ , по Казикаев [2].

Тя илюстрира степента на изменение на якостните свойства (в случая якостта на натиск в реалния масив  $R_{\text{масив}}^H$ ) и е известна като равнище на мащабност. Очевидно при увеличаване на отношението  $L/a$  намалява якостта  $R_{\text{масив}}^H$ . В случая като базова стойност е приета якостта на натиск, определена в лабораторни условия  $R_0$ .

Без да се поставя дискуссионно, определено може да се каже, че **Geological Strength Index (GSI)** намира най-широко приложение при оразмеряване на конструктивните елементи: камери, целици и пр. На фиг.2 е показана схема на GSI. Графиката има матрична форма като в хоризонталната равнина на две взаимно перпендикулярни оси са отбелязани двете групи фактори: Structure Rate (SR) и Surface Condition Rate (SCR). На вертикалната ос са нанесени стойностите на GSI. Благодарение на матричната форма на представяне, GSI дава възможност да се определят константите  $m$  и  $s$ , участващи в критериите Ноек-Браун (Н-В) и Mohr-Coulomb (М-С). Това са двата най-често използвани критерии за разрушаване в условията на здрави, но напукани скали.



Фиг.2 Диаграма на изменението на GSI в зависимост от Structure Rate (SR) и Surface Condition Rate (SCR).

### 3. Натоварване на целиците

Определянето на натоварването на целиците е основна стъпка при оразмеряване на камерно-стълбовата система (КСС). В нашата страна е натрупан богат опит по прилагане на тази добивна технология. Водещо начало е определяне на коравината на целиците  $G$ .

$$G = \frac{EF}{h} \quad (3)$$

където  $E$  е модулът на еластичност;  
 $F$  – сечението на целика;  
 $h$  – височината на целика.

Тогава, ако  $\Delta$  е измереното абсолютно преместване под действието на натоварването  $N$ , в сила ще бъде следното условие

$$N = G\Delta \quad (4)$$

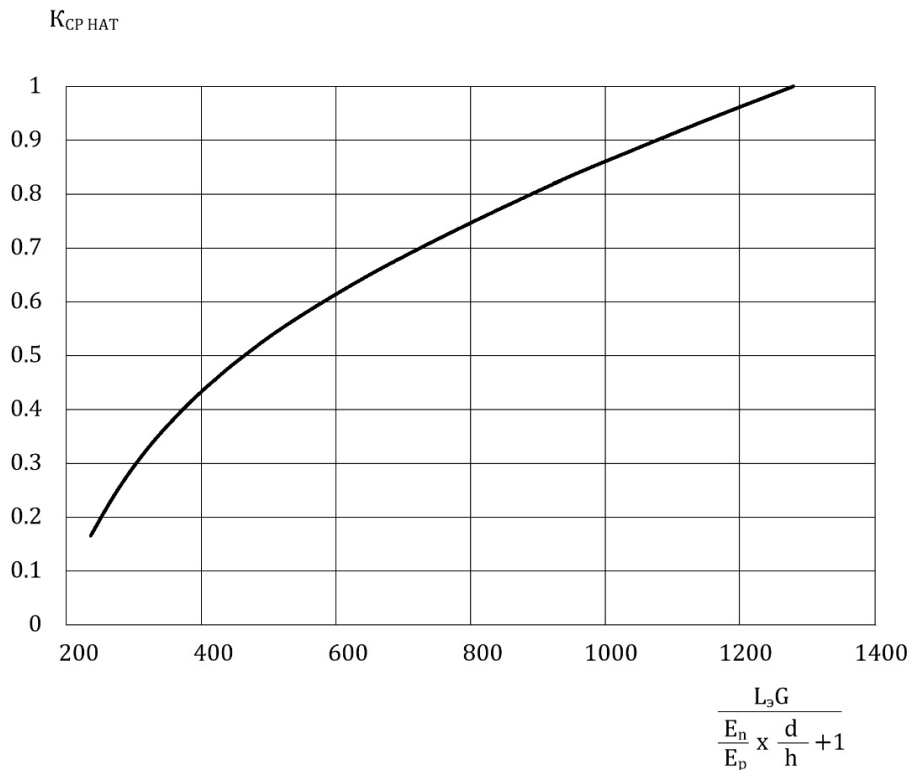
В границите на даден добивен блок не могат всички целици да бъдат подложени на едно и също натоварване. Затова е препоръчително да се използва сумарното натоварване на целиците  $\sum_{i=1}^n N_i$  където  $n$  е броят на целиците в блока (панела). Тогава средният коефициент на натоварване  $K_{\text{нат}}^{\text{ср}}$  ще бъде

$$K_{\text{нат}}^{\text{ср}} = \frac{\sum N_i}{\gamma HS} \quad (5)$$

където  $S$  е общата поддържана площ от целици в блока (панела).

Очевидно  $\gamma HS$  е максимално възможният товар. Той е обусловен от дълбочината на разработване  $H$  и обемното тегло на скалите до повърхността  $\gamma$ . Известни са и други хипотези за скалния натиск в добивния блок: хипотезата на свода на естествено равновесие, хипотезата на вълната на натиска (при

повторно разработване с отнемане на част от целиците или намаляване на тяхното сечение). В дадено руднично поле се разработват голям брой блокове (панели), всеки със своите специфични особености: размери, височина на камерата, респ. височина на целиците, ъгъл на наклона на рудното тяло, деформационни характеристики на рудата и страничните скали. Така назрява необходимостта да се търси функционална зависимост между коефициента  $K_{\text{нат}}^{\text{CP}}$  и минно-техническите и природни фактори. Тези фактори А.Б.Макаров [3] обединява под названието „комплексен параметър“. На фиг.3 е показана графична зависимост между средния коефициент на натоварване  $K_{\text{нат}}^{\text{CP}}$  и „комплексния параметър“.



Фиг.3 Зависимост между средния коефициент на натоварване на целиците  $K_{\text{нат}}^{\text{CP}}$  и комплексния параметър  $\frac{L_{\text{св}}G}{\frac{E_n}{E_p} \times \frac{d}{h} + 1}$ , по Макаров [3].

Тя е построена след обработване на данните от  $4.5 \times 10^3$  панела ( $560 \times 10^3$ ) целика [3]. Физическият смисъл на зависимостта е: с увеличаване на еквивалентния размер  $L_{\text{св}}$  и коравината на целиците  $G$  се увеличава натоварването на целиците. Тук големият въпрос остава къде да се разположат бариерните целици, които трябва да поемат целия геостатичен товар. Отношенията  $\frac{E_n}{E_p}$ , както  $\frac{d+h}{h}$ , имат корекционни функции. Изхождайки от натрупания практически опит, както и от регистрираните случаи на пропадане на целици, тук се предлага по-различен подход. Той се основава на скоростта на разрушаване на целиците. В едни случаи скоростта е 10-12 m/денонощие, докато в други процесът протича почти мигновено, като е съпроводен с голяма интензивност на въздушната вълна. На тази основа се предлага следната зависимост между средния коефициент на натоварване  $K_{\text{нат}}^{\text{CP}}$  и минно-техническите и природни фактори на целиците

$$K_{\text{нат}}^{\text{CP}} = 1 - \left( \frac{a}{e} \right)^{\frac{L_{\text{св}}G}{\frac{E_n}{E_p} \times \frac{d+h}{h}}} \quad (6)$$

където  $L_{\text{св}}$  е еквивалентният размер на добивния блок;

- $G$  - коравината на целиците;
- $h$  - височината на целиците, в повечето случаи е равна на дебелината на находището;
- $d$  - ширината на целиците;
- $a$  - коефициентът на пропорционалност ( $1 \leq a \leq 2.5$ );
- $e$  - неперовото число  $e=2.718$ ;
- $E_p$  – модулът на еластичност на рудата;
- $E_n$  – модулът на еластичност на страничните скали.

Практическата значимост на коефициента на натоварване  $K_{нат}^{CP}$  се потвърждава от следните два примера. През 1977 година се получава пропадане на значителна площ от 26 р.т. на рудник „Плакалница“. През 1978 година в рудник „Кошава“ се наблюдава аналогично явление. Въпреки че природните условия в двата рудника са коренно различни, разглежданите аварийни случаи могат да намерят общо обяснение. Става дума за поддържане на добивното пространство чрез целици (камерно-сълбова система на разработване). В първия случай експлоатационното поле достига много големи размери както по линията на разпространение, така и по линията на западане. Това означава значително увеличаване на еквивалентния размер  $L_{ecv}$  и съгласно израза (6) значително увеличаване на  $K_{нат}^{CP}$ ; увеличава се натоварването върху поддържащите целици. Тяхната носеща способност е изчерпана и процесът на разрушаване се активизира. За инициатор на така описаното събитие може да послужи сеизмичният ефект от взривяването. Съгласно приетата технология то се извършва ежедневно. При сондажно отбиване на рудата интервалът на взривяване е по-разреден, но количеството на едновременно взривяването ВВ е значително по-голямо. Във втория случай площта на експлоатационното поле се запазва относително постоянна, т.е.  $L_{ecv} \approx const$ . В стремежа за увеличаване на коефициента на извличане  $K_{извл}$  на полезното изкопаемо, в случая гипсовата суровина, се пристъпва към намаляване на височината на предпазния слой от гипс в тавана на добивната камера. По този начин коравината на системата камера – целик – камера, представена чрез произведението на две намаляващи отношения довежда до увеличаване на  $K_{нат}^{CP}$  съгласно израза (6). Следва да се подчертае, че процесът на разрушаване на целиците съгласно описаните два случая е коренно различен. В рудник „Плакалница“ той се развива със скорост 10-12 м/денонощие, докато в рудник „Кошава“ се наблюдава почти мигновено пропадане, съпроводено със силен въздушен ефект (въздушна вълна).

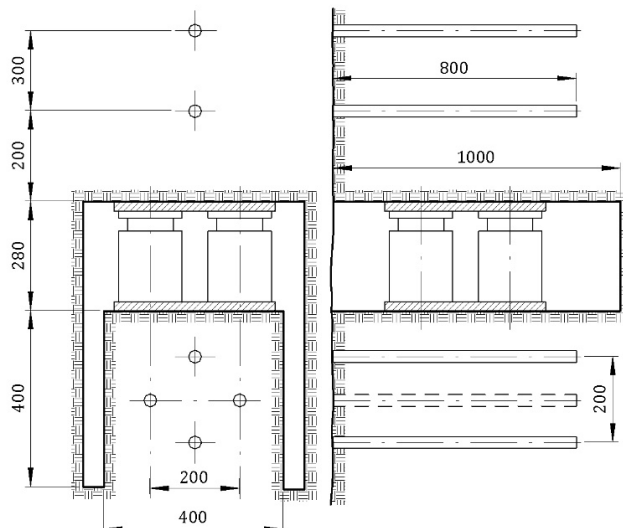
#### 4. Оценка на устойчиво състояние на целиците

Ефективността на всяка добивна технология в максимална степен зависи от устойчивото състояние на конструктивните елементи, които я изграждат. Независимо дали се използват аналитични, числени или емпирични методи за тяхното оразмеряване, първостепенен остава въпросът за въвеждане на достатъчно представителни входни данни. Очевидно не съществува знак за равенство между механичните показатели, определени в лабораторни условия и тези в натура. Някои изследователи определят тази разлика на порядък, отчитайки влиянието на множество фактори в реалните условия на естествено залягане. Следователно, съществува дълъг път от лабораторните изпитания до използване на показатели, съответстващи на поведението на реалния масив. Съществено условие в така формулираната постановка е, че съществува междинно звено и то е определянето на механичните показатели на скалите върху експериментални блокове, оформени в стените на минните изработки. Техните размери се основават на техническите възможности на апаратурата за натоварване, която трябва да осигури развитието на деформационния процес вкл. достигане до фазата на разрушаване. Тази постановка е известна още от 50<sup>те</sup> години на миналия век, когато се оформят призми, подложени на срязващи усилия за определяне на ъглите на разрушаване в хидро-технически съоръжения [4]. През 70<sup>те</sup> години на миналия век за условията на рудник „Плакалница“ бяха изпитани за първи път у нас 3 броя призми за определяне на деформационните показатели на рудата. Изследването беше проведено във връзка с определяне на размерите на поддържащите целици. В настоящата статия се предлага подход, който може да се приеме като продължение на експерименталната работа в рудник „Плакалница“, извършена с прякото участие на

автора. Най-същественният елемент в случая е отчитането на сеизмичните събития, на които са изложени конструктивните елементи на системата на разработване в подземния рудник. Тези събития могат да се класифицират така:

- сеизмичният ефект от взривните работи;
- преразпределението на действащите напрежения около добивните изработки в резултат на преместване на фронта на минните работи;
- техногенните земетресения при възникване на разрушителен процес (вкл. регламентирано разрушаване);
- динамичното натоварване от движението на тежки товаро-транспортни машини.

Потърсена е аналогия с процесите, свързани с втечняването на меки скали под въздействие на земетресения [5]. Използването на призми е продиктувано от обстоятелството, че върху тях може да се въздейства многократно т.е. да се прилага цикличност при натоварването. В съчетание със сеизмичния ефект се създава моделна постановка, която по никакъв друг начин не може да се приближи до поведението на реалния масив под въздействие на минните работи. На фиг. 4 е показана схема на моделната постановка за изследване на деформационните и якостни показатели в натурни условия.



Фиг.4 Схема на опитната постановка за определяне на механичните свойства в руднични условия.

Призмите се оформят със специална сонда, основаваща се на диамантено сондиране с въртеливо действие за да се сведе до минимум образуването на микропукнатини при пробиване. В горния край се оформя ниша за разполагане на натоварващата система (хидравлични крикове). Пробиват се допълнително 6 отвора за регистриране на вертикалните и хоризонтални премествания. От скалния материал, получен при оформяне на призмите, се оформят образци за изпитване в лабораторни условия. Така се определят базовите параметри модул на еластичност  $E_0^*$  и якост на натиск  $\sigma_{co}^*$ . Изхождайки от обстоятелството за цикличност на процесите при натоварване, се въвеждат две понятия: *Cycle Stress Ratio (CSR)* и *Cycle Resistance Ratio (SRR)*. В по-нататъшната работа те ще играят главна роля при оценка на устойчивото състояние. Успешната реализация на предлаганата процедура изисква детайлно изучаване на структурната нарушеност на масива. Дългогодишните изследвания върху изучаване на напукаността показват, при определяне на деформационните способности на масива най-съществено влияние оказват: размерът на елементарния структурен блок, определен в резултат на обективно съществуващите системи пукнатини  $l_{cmp}$  бл, линейният размер на изпитваната призма  $l_{np}$ , обемът на призмата  $V_L$ . За да се търси функционална зависимост на изменението на деформационните показатели при преминаване от лабораторни условия към реалния масив  $E_0$  е

необходимо да се изпитат минимум три групи призми. В случая те се различават по линейните си размери, а именно:

$$l_{np} \rightarrow 0.4\text{m} \rightarrow 0.6\text{m} \rightarrow 0.8\text{m}.$$

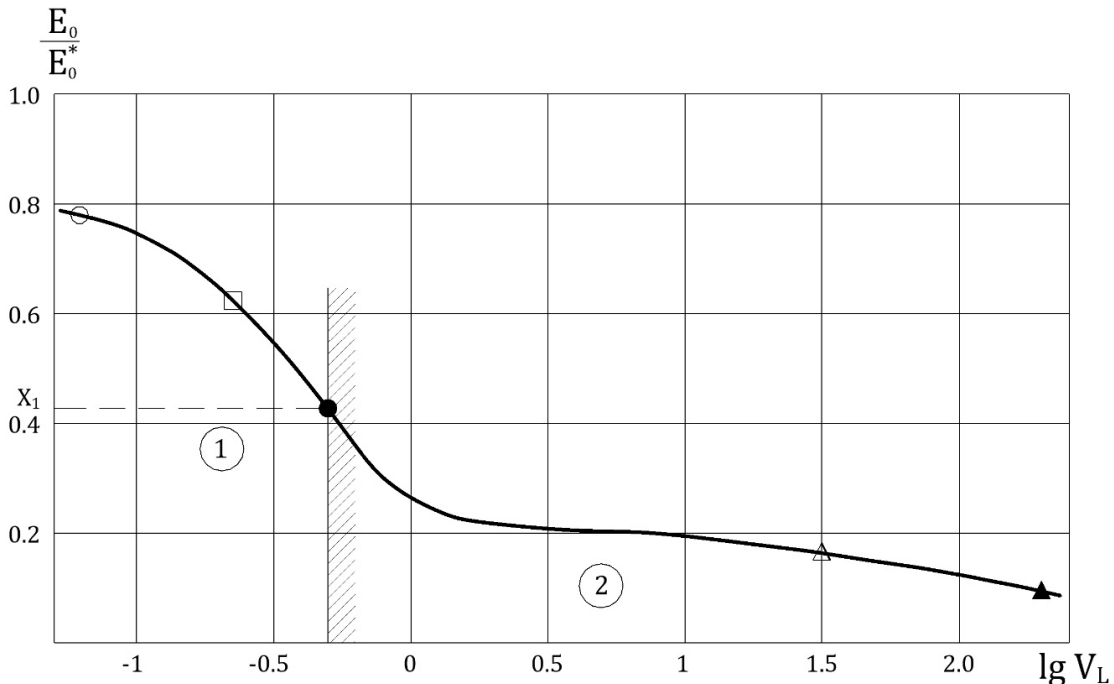
Това означава изменение на обема, а именно:

$V_L \rightarrow 0.064\text{m}^3 \rightarrow 0.216\text{m}^3 \rightarrow 0.512\text{m}^3$ . Необходимостта от представителност изисква изпитването на достатъчен брой призми за определяне на деформационните способности на масива. Това дава възможност да се изведе функционална зависимост от вида

$$\frac{E_0}{E_0^*} = \frac{1}{e^{\frac{l_{стр\ бл}}{a_1 V_L}}} \quad (7)$$

където  $a_1$  е коефициентът на пропорционалност,  $\text{m}^{-3}$ .

Получената зависимост (7) изисква използване на екстраполация при определяне на деформационните показатели на реални конструктивни елементи на добивната технология, например поддържащи целици. За целта се използва коефициентът на пропорционалност  $a_1$ , чийто стойности се определят от обема на разглеждания целика, например  $a_1 = 0.5\text{m}^{-3}$  за целици до  $30\text{m}^3$  и  $a_1 = 0.05\text{m}^{-3}$  за целици до  $200\text{m}^3$ . На фиг.5 е показана графична интерпретация на формула (7).



Фиг.5 Графична интерпретация на формулата за определяне на отношението  $\frac{E_0}{E_0^*}$ , 1-зона на преки измервания; 2-зона на екстраполация; ○-първа група призми с обем  $V_L=0.064\text{m}^3$ ; □-втора група призми с обем  $V_L=0.216\text{m}^3$ ; ●-трета група призми с обем  $V_L=0.512\text{m}^3$ ; △-целици с обем до  $30\text{m}^3$ ; ▲-целици с обем до  $200\text{m}^3$ ;  $X_1=0.43$  – съгласно текста.

Тя илюстрира зоната на преките измервания 1 и зоната на екстраполация 2. Зоната на екстраполация играе важна роля в по-нататъшните разсъждения относно определянето на CSR и от там на коефициента на устойчивост  $K_{уст}$  на поддържащите целици.

Натоварващите устройства трябва да имат техническа способност за разрушаване на така описаните призми. Това означава да се съберат достатъчно представителни данни за якостта на натиск в реални условия  $\sigma_{co}$ . Тогава може да се формира отношението  $\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co}^*}$ . Изпитанията върху трите групи призми показват влиянието на площта  $S$ , върху която се осъществява натоварването, ъгъла на наклона  $\varphi$  между посоката на приложеното натоварване и преобладаващата система пукнатини, коефициента на

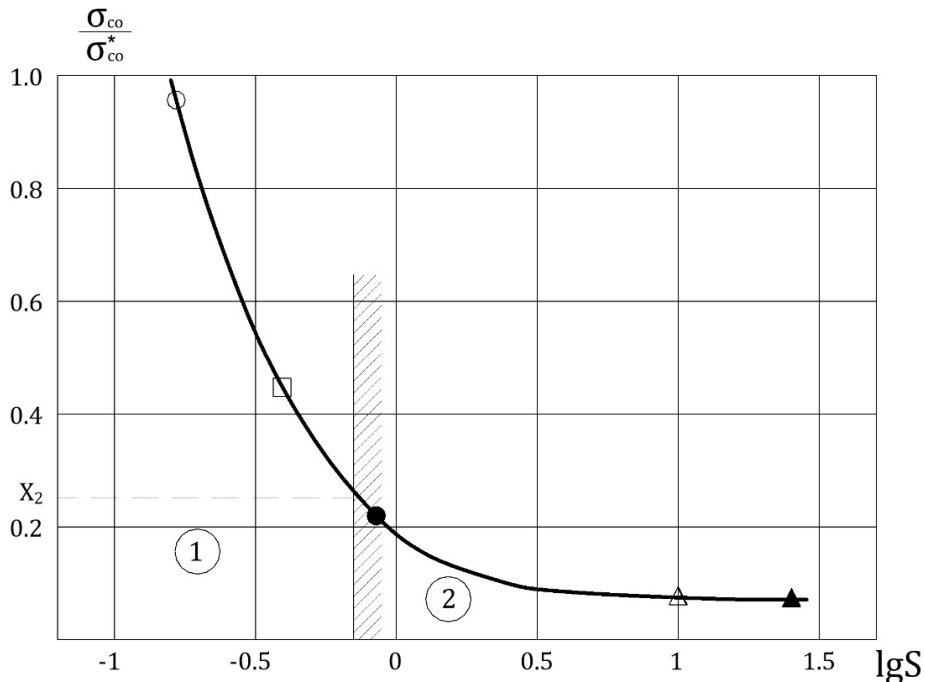


триене по пукнатинните повърхнини  $f$ . Натрупаните експериментални данни дават основание да се изведе следната функционална зависимост

$$\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co}^*} = \frac{1}{e^{tg\varphi x f} a_2 S \sqrt{n}} \quad (8)$$

където  $a_2$  е коефициентът на пропорционалност,  $m^{-2}$ ;  
 $n$  - броят на системите пукнатини.

Значението на коефициента  $a_2$  е аналогично с това на  $a_1$ . Неговата употреба е задължителна, тъй като якостните свойства в реални условия могат да се определят само по пътя на екстраполацията. В конкретния случай:  $a_2=0.5m^{-2}$  за целици с площ до  $10 m^2$  и  $a_2=0.8m^{-2}$  за целици с площ до  $100 m^2$ . На фиг.6 е показана графична интерпретация на формула (8).

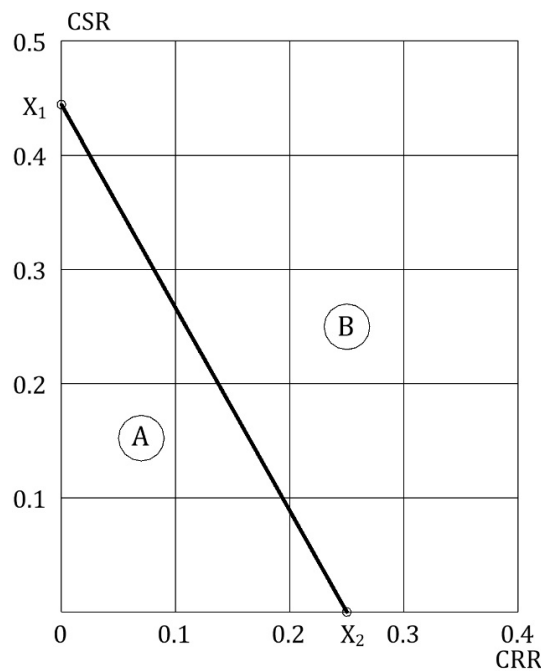


Фиг.6 Графична интерпретация на формулата за определяне на отношението  $\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co}^*}$ , 1-зона на преки измервания; 2-зона на екстраполация;  $\circ$ -първа група призми с площ  $S=0.16 m^2$ ;  $\square$ -втора група призми с площ  $S=0.36 m^2$ ;  $\bullet$ -трета група призми с площ  $S=0.64 m^2$ ;  $\Delta$ - целици с площ до  $10 m^2$ ;  $\blacktriangle$ -целици с площ до  $25 m^2$ ;  $X_2=0.25$ - съгласно текста.

И тук са определени двете зони: зона 1 на преки измервания и зона 2 на екстраполация. Изведените зависимости (7) и (8) имат аналогичен характер. Заедно с натрупания обем експериментални данни те дават основание да се приеме, че отношението  $\frac{E_0}{E_0^*}$  се идентифицира като Cycle Stress Ratio (SSR), а отношението  $\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co}^*}$  - като Cycle Resistance Ratio (CRR). Несъответствието между якостните и деформационни показатели, определени в натурни и лабораторни условия позволяват да се търси функционална зависимост между тези два показателя и тя има следния ви

$$CSR = SRR^{1.25} \quad (9)$$

С извеждане на формула (9) се затваря цикълът за определяне на коефициента на устойчивост на даден целик  $K_{yc}$ . Използва се графично построяване, което следва фиг.7.



Фиг.7 Определяне на  $K_{уст}$  в зависимост от CSR и CRR; **A**-зона на устойчиво състояние,  $K_{уст} > 1$ ; **B**-зона на разрушаване,  $K_{уст} \leq 1$ ; стойностите на  $X_1$  и  $X_2$  се определят съгласно графичните построения на фиг.5 и фиг.6

Върху правоъгълна диаграма са нанесени осите CRR (хоризонталната ос) и CSR (вертикалната ос). Размерите на правоъгълната диаграма се определят от съответните точки на екстраполация съгласно фиг.5 за CSR и съгласно фиг. 6 за CRR. Диагоналната линия, свързваща точките на екстраполация, съответно  $X_1$  и  $X_2$  определя зоните: зона **B** на разрушаване; зона **A** на устойчивост. В зависимост от това дали изследваната точката лежи в горната или долната половина се определя коефициентът на устойчивост  $K_{уст}$ .

$K_{уст} \leq 1$  - когато точката лежи в зона **B**;

$K_{уст} \geq 1$  – когато точката лежи в зона **A**;

$K_{уст} = 1$  – когато точката лежи на диагоналната линия.

За определяне на коефициента на устойчивост на даден конструктивен елемент (поддържащ целик) трябва да се премине през следните стъпки.

- Определяне на напрегнатото състояние на даден обект (целик). Използва се конкретен метод, като в случая са възможни Метод на разтоварването, Метод на крайните елементи и т.н. Получената стойност се идентифицира като  $\sigma_{estimate}$ .

- Съгласно израза (8), следвайки пропорцията  $\frac{\sigma_{estimate}}{\sigma_{co}^*}$  се получава значението на

$CRR_{estimate}$ .

- От израза (9) се определя значението на  $CSR_{estimate}$ .

- С помощта на правоъгълната диаграма – фиг.7 се определя положението на точка **A**, съответстващо на  $K_{уст}$ .

Тъй като  $K_{уст}$  варира в широки граници в зависимост от местоположението на целиците в добивния блок, задължително условие е определяне на напреженията да става минимум по два метода. Практиката по прилагане на Метода на разтоварването е усвоена, благодарение на извършените по-рано у нас руднични измервания. Не бива да се подценяват съвременните акустични методи за оценка на деформационния процес и разрушаване на масива. Представеният подход за оценка на



устойчивото състояние на целиците поставя въпроса за организацията и управлението на базата данни, която непрекъснато следва да се обогатява паралелно с развитието на минните работи.

### 5. Заключение

Отчитайки факторите, определящи натоварването на целиците се установява, че най-съществено влияние оказват сеизмичните въздействия. Те се свеждат до: влияние на ПВР, динамичните натоварвания при преразпределенията на напреженията, движението на тежко-товарните машини, техногенните земетресения.

Сеизмичните въздействия имат цикличен характер и това обуславя необходимостта от изучаване на деформационните и якостни свойства върху призми, оформени в естествени условия – в стените на минните изработки.

Цикличността на деформационния процес се отразява върху характера на разрушаване. То не протича мигновено, което означава, че при оценка на НДС задължително следва да се оценява факторът „време“.

Върху достоверността на получените резултати съществено влияние оказва събирането и систематизирането на огромно количество изходна информация. Това поставя като задължително условие създаването и управлението на ефективна База от данни. Тя следва да функционира през цялото съществуване на рудника, за да може получените резултати да се използват в други аналогични обекти.

Отношенията  $\frac{E_o}{E_o^*}$  и  $\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co}^*}$  позволяват да се постигне така необходимият преход от лабораторни към руднични изпитания. Така отпада необходимостта от въвеждане на коефициент на мащабния ефект, който в някои случаи има чисто субективен характер.

На лице е основание да се идентифицират двата показателя *Cycle Resistance Ratio (CRR)* и *Cycle Stress Ratio (SSR)*. Тяхното отношение определя коефициента на устойчивост  $K_{ycm}$ , който се явява основен критерий за оценка на ефективността.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баклашов, И.В. (2004). Геомеханика, том I, Основы геомеханики. Издательство Московского Государственного Горного Университета.
2. Казикаев, Д.М. (2005). Геомеханика подземной разработки руд. Издательство Московского Государственного Горного Университета.
3. Макаров, А.Б. (2006). Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. Издательство Горная книга. Москва.
4. Мюллер, Л. (1971). Инженерная геология. Механика скальных массивов. Мир, Москва.
5. Милев, Н., Брионес, Х. (2023). Влияние на втечняването на почвите и локалните геоложки условия върху щетите от земетресението в Турция от 06.02.2023 г.-част I. Минно дело и геология. 5-6/2023.
6. Михайлов, Г.А. (2022). Геомеханика на поддържащите целици при камерно-стълбова система на разработване. Proceedings of the X international Geomechanics Conference. 19-23 September 2022, Varna, Bulgaria.