

ГЕОМЕХАНИЧНИ АСПЕКТИ НА СИСТЕМАТА С ПОДЕТАЖНО ОБРУШАВАНЕ

Георги Михайлов, Георги Трапов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Изучаването на геомеханичните аспекти на добивната технология стои в основата на комплексната оценка на нейната ефективност. За системата с подетажно обрушаване това е от особено важно значение, тъй като нейното успешно приложение е единствено възможно при отлично съчетание на природната даденост с конструктивните елементи на добивната технология. За оценка на влиянието на най-съществените фактори, определящи геомеханичните аспекти на системата с подетажно обрушаване е използван Методът на крайните елементи. 1. Установени са отклонения от хипотезата за геостатичния товар при изследване на напрегнатото състояние на ненарушения масив, които се обясняват с нееднородността на средата и силно пресечения терен на повърхността. 2. Изследвано е влиянието на пространственото разположение на подетажните изработки (галерии и ортове) върху напрегнатото и деформирано състояние на масива с оглед на тяхната безопасна експлоатация при използване на високо-производителна товаро-транспортна механизация. 3. Изведени са основните закономерности при развитие на обрушаването във височина, вкл. до повърхността. 4. Оценено е влиянието на временните открити пространства, които възникват неизбежно при въвеждане на нов подетаж в експлоатация. Тези фактори формират геомеханичните аспекти на системата с подетажно обрушаване. Тяхното подробно изучаване и ефективно управление гарантират високи технико-икономически показатели, осигуряващи конкурентна способност при сравняване с други добивни технологии.

GEOMECHANICAL ASPECTS OF THE SUBLEVEL CAVING MINING METHOD

Georgi Mihaylov, Georgi Trapov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. The study of the geomechanical aspects of the mining method underlies the comprehensive assessment of its effectiveness. This is of particularly great importance as to the sublevel mining method since its successful application is only feasible with the perfect combination of the natural reality and the constructional components of the mining technique. The evaluation of the influence of the most essential factors determining the geomechanical aspects of the sublevel caving mining method has employed the Finite Element Method. 1. There have been identified deviations from the gravity loading hypothesis when the stress state of the undisturbed rock mass has been studied and these are accounted for by non-homogeneity of the medium and the severely rugged terrain. 2. The influence of the attitude of the sublevel openings (drifts and cross headings) on the strain-stress state of the rock mass has been studied with a view to mining them safely using heavy-duty load-hauling machinery and equipment. 3. There have been deduced the basic consistent features of the upward caving process towards the surface. 4. An assessment has been made of the impact of the temporary open stopes that inevitably occur with advancing on a new sublevel. These factors form the geomechanical aspects of the sublevel caving mining method. Their detailed study and effective management will guarantee high feasibility indicators that will ensure its competitive capability compared with other mining methods.

Въведение

Системата с подетажно обрушаване намира широко приложение в световната практика. Нейните най-големи предимства са възможността за използване на високо-производителна пробивна, товаро-доставъчна и транспортна механизация, а така също адаптивността ѝ към елементите на залягане. Практически системата може да се прилага при всякакъв ъгъл на наклона от 0° до 90°, ако дебелината (мощността) на рудното тяло позволява използването на такава технология. Аналогично стои въпросът с морфологията на рудните тела. Системата е приложима при най-разнообразни форми на находищата (пластове, жили, гнезда, лещи), но най-често се среща при разработване на щокове. Задължително условие за постигане на висока ефективност е страничните скали да бъдат средно устойчиви до неустойчиви, склонни към самообрушаване, а рудата да бъде средно устойчива до устойчива, способна да поеме съществено преразпределение на напрежението около подготвителните и нарезните изработки. Системата с подетажно обрушаване се класифицира като висо-

ко-производителна добивна технология и затова управленческите екипи често я предпочитат при избора на окончателно решение. Същевременно системата с подетажно обрушаване има сериозни недостатъци. На първо място това са загубите и обедняването. Източването се извършва при наличие на контакт на рудата с обрушени скали, като постоянно се изисква решаване на дилемата загуби-обедняване. При разработване на мощни рудни тела неизбежно земната повърхност и разкриващите изработки попадат в зона на влияние на минните работи. Налага се изразходване на значителни средства за преодоляване на вредните последици от това явление. От казаното следва, че системата с подетажно обрушаване съвсем не бива еднозначно да се определя като ефективна добивна технология.

С развитие на добивните работи в дълбочина прогресивно се влошават природните условия. Заедно с посочените вече недостатъци се намесва една съществена група фактори, които най-общо имат отношение към схемата на разполагане на подготвително-нарезните изработки, геомет-

ричната характеристика на конструктивните елементи на блока, последователността на развитие на минните работи в рамките на един подетаж, панел, секция и пр. Тези фактори най-често се обединяват в понятието геомеханични аспекти на системата с подетажно обрушаване. Някои от тях се разглеждат в настоящата статия, като по-конкретно вниманието се насочва към специфичните особености на системата с подетажно обрушаване при разработване на руден щок.

Оценка на напрегнатото състояние на ненарушения масив

При изследване на напрегнатото и деформирано състояние (НДС) на масива около подготвителните и нарезни изработки от съществено значение е изборът на хипотеза за формиращото се поле на напрежения в ненарушения масив. Известни са множество хипотези, но в крайна сметка те се обединяват около геостатичния товар и хидростатичното налягане. Изборът зависи от приетия коефициент на страничния отпор, който от своя страна се определя от коефициента на Поасон. В литературата отдавна се е наложило мнението, че тензорът на напрежение на ненарушения масив следва да се представи като сума от две компоненти: гравитационна и тектонска. Изхождайки от тази гледна точка, коефициентът на страничния отпор може да получи стойност по-голяма от единица. Тогава постановката на задачата, основаваща се на еластичното поведение на средата, не може да се опише с математичния апарат на Теорията на еластичността. В такава ситуация анализът и интерпретацията на наличните данни са невъзможни без използване на полеви измервания за определяне на напреженията в ненарушения масив. Проблемът е, че дори при голям брой данни, натрупани от полеви измервания, дефиниращи заключения на базата на интерполационните процедури е твърде рисковано да се правят. Определянето на напрегнатото състояние на ненарушения масив с помощта на Метода на крайните елементи (МКЕ) има за цел да избегне някои от значителните трудности (голям разход на човешки и материални ресурси), които съпътстват неизбежно измерванията в натурни условия. Първата стъпка е изграждане на изчислителна схема, която максимално да съответства на структурата, морфологията, типа и елементите на залягане на литоложките разновидности. За целта е използван един от напречните геоложки разрези на находище "Челопеч". Този факт до известна степен предопределя ориентацията на по-нататъшните разсъждения. Те са насочени главно към системата с подетажно обрушаване, която дълги години е основна добивна технология за рудник "Челопеч". Изчислителната схема включва 9 литоложки разновидности. Така се отчита един от съществения фактори, влияещи върху напрегнатото състояние на ненарушения масив – нееднородността на средата. В таблицата са посочени физико-механичните свойства на отделните литоложки разновидности, изграждащи изчислителната схема. За да се отчете и влиянието на терена на повърхността е използван и теренно-ситуационният план на находището. Разрезът е ориентиран северозапад-югоизток. В него попада блок 150, който в продължение на повече от десет години се разработва чрез подетажно обрушаване. За блока е

характерно това, че обрушените пространства са достигнали до повърхността. Отделните литоложки разновидности се отличават с голяма степен на изменчивост на морфологията и елементите на залягане. При съставяне на изчислителната схема специално внимание се отделя на етапите на развитие на минните работи. Условно те са разделени на два: изземване на запасите съответно над хор.405 m и под хор.405 m. Този подход се оправдава от факта, че през последните 3-5 години изземването на запасите в блок 150 се извършва под хор.405 m и динамиката на развитие на минните работи е напълно актуална за рудника. Изчислителната схема е изградена от четириъгълни елементи. Тя включва 1640 възела ($N_e=1640$) и 1560 елемента ($N_{el}=1560$). Масивът се моделира като еластична среда. Най-сериозният проблем при съставяне на изчислителната схема се оказва систематизирането на достатъчно представителни данни за литоложките разновидности в дълбочина. Авторският колектив изпитва сериозни затруднения с интерпретацията на наличната информация, тъй като тя се основава главно на геоложки ядров материал т.е. няма данни за определяне на якостните и деформационни свойства в естествени (натурни) условия. Освен това, диаметърът на пробните тела, използвани при лабораторните изпитания, не винаги съответства на стандартните изисквания за минимална стойност $d_{min}=50mm$. Реализацията на решението по МКЕ е извършена със собствен програмен продукт FEMEL. В основата на алгоритъма за изграждане на мрежа от елементи е заложена човекомашинна процедура, целяща автоматично генериране на възлите. В случая човешкият фактор е необходим дотолкова, доколкото сложните морфологични дадености на отделните литоложки разновидности не е възможно да се опишат автоматично. Натрупаният опит по използване на МКЕ показва, че четириъгълните елементи са подходящи при описание както на пластови и пластообразни морфологични дадености, така и на жили щокове и гнезда. Анализът на НДС на ненарушения масив се основава на машинните графики, илюстриращи вертикалните(σ_y), хоризонталните(σ_x), главните(σ_1)и(σ_2) напрежения, завъртането на главните напрежения(α) в равнината (ХОУ), степента на устойчивост на масива(SF). На фиг.1 е показана машинната графика, илюстрираща разпределението на вертикалните напрежения σ_y в ненарушения масив. Ясно се забелязва неравномерният характер, водещ до промяна на градиента както във вертикална, така и в хоризонтална посока. Внимателният анализ показва, че изолиниите на напреженията до голяма степен съвпадат с контура на литоложките разновидности. Общата формулировка за влиянието на нееднородността на средата върху напрегнатото състояние на ненарушения масив се идентифицира с различните деформационни характеристики, респ. различната коравина на отделните разновидности в изчислителната схема. Анализът на графиката, характеризираща показателя SF показва, че съществуват зони, за които $SF<1$, т.е. разрушаване. При разглеждане на ненарушен масив този факт е неочакван-противоречи на логиката, че възниква разрушаване преди да са започнали добивни работи. Зоните са две. Те се намират в непосредствена близост до повърхността, което също изглежда парадоксално. Едната зона съвпада с алувиално-делувиалните наслаги от кватернера, които се намират в най-югоизточната част на разреза (изчислителната схема). Другата зона съвпада със съществуващото обрушаване на

повърхността над блок 150. По-голям интерес представлява втората зона и тя ще бъде обект на анализ по-нататък. Въпреки максималният стремеж за коректност при въвеждане на входните данни за свойствата на масива, очевидно възниква проблем при изучаване на напрегнатото състояние на ненарушения масив с помощта на МКЕ. Поставя се еластична задача, което означава, че преместванията, респ. деформациите и напреженията, са мигновени. Това противоречи с изграждане на приемлива концепция за поведението на средата най-малко заради факта, че не се отчита паметта на масива в исторически план. Затова се възприема подход за намаляване на коравината на елементите, за които не е изпълнено условието $SF > 1$, т.е. настъпва разрушаване. Резултатите показват значително намаляване на разрушените елементи. При повторно намаляване на коравината (само на разрушените елементи) практически остават само тези, които съвпадат със съществуващото обрушено пространство над блок 150. Това обстоятелство дава основание най-малко за два извода.

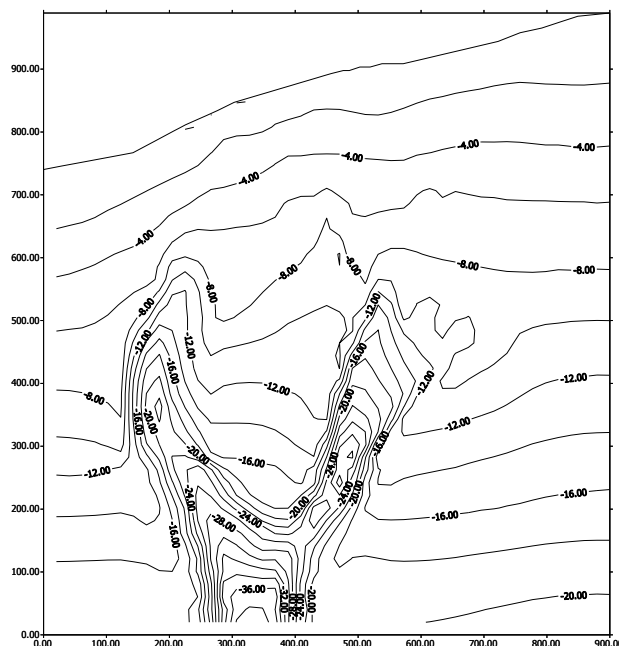
Таблица 1

Деформационни характеристики на скалите, включени в изчислителната схема

Литоложка разновидност	Стратиграфско означение	Модул на еластичност, E , [GPa]	Коефициент на Поасон, μ
Воздолски вулканогенен член	Che/vK ₂	21.1	0.31
Пропилити		12.5	0.33
Вторични кварцити	Che/vK ₂	65	0.28
Субвулкански андезити	α K ₂	10.5	0.31
Челопешка вулканогенна свита	CheK ₂	5.6	0.35
Мирковска варовикова свита	MiK ₂	32.4	0.32
Чуговишка флишка свита	ChuK ₂	17.5	0.32
Алувиално-делувиално полувиални наслаги, кватернер	Q	6	0.4
Свежи андезити	α K ₂	21.95	0.31

Последователното изменение на коравината на определени елементи, регистриращи разрушаване при ненарушена среда, е сходим процес. Той може да се използва като първоначален етап преди да се предприеме решаване на нелинейната задача.

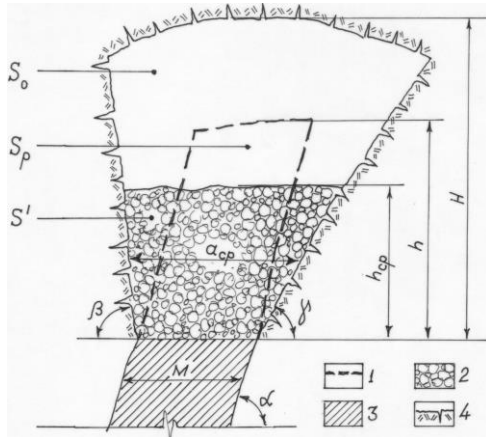
При изследване на напрегнатото състояние на ненарушения масив, за сметка на различните механични свойства на отделните скални разновидности, е възможно дори на повърхността да съществуват зони на разрушаване. Това състояние на масива е латентно и то може да се активизира в следствие под влияние на минните работи.



Фиг. 1. Разпределение на вертикалните напрежения σ_v в ненарушения масив.

Механизъм и развитие на обрушаването във височина

Ефективното прилагане на системата с подетажно обрушаване зависи в най-голяма степен от определено съчетание на група природни условия и минно-технически средства за извършване на добивната технология. Тъй като не се прилага принудително обрушаване, в началния етап се оформят открити пространства, които в последствие се запълват със самообрушили се скали. Отбиването на рудата, както и източването се извършва при наличие на контакт с обрушена (разрушена) материална среда. Тези специфични особености определят зоната на приложимост на системата с подетажно обрушаване. Отклонението в едно или друга степен от т.н. оптимални условия довежда до съществено влошаване на технико-икономическите показатели и от там на ефективността на добивната технология. При системата с подетажно обрушаване определяща роля имат зоните на разрушаване, които се развиват прогресивно с добивните работи. От тази гледна точка геомеханичните аспекти се отличават с динамиката на своето влияние върху цялата инфраструктура на рудника, включително и върху повърхността. На фиг.2 е показана принципна схема на развитието на обрушаването във височина. За основа е прието рудно тяло с дебелина M и ъгъл на наклона α . Изземва се определен руден контур с височина h . Задачата се разглежда като равнинна, така че даден обем се определя като произведение на сечение по единица дължина. Тогава сечението на рудния контур е $S_p = hM$. В резултат на добивните работи възниква обрушаване на страничните скали. Образува се свод на естествено равновесие. Общата височина на обрушеното пространство е H , а сечението – S_0 . След източване на отбитата руда остават обрушените скали. Те заемат част от общото пространство и имат сечение S' . Неговата площ се представя като произведение на величините a_{cp} и h_{cp} , т.е. $S' = a_{cp}h_{cp}$ (вж.фиг.2). Отчитайки коефициента на разбухване K_p в сила ще бъде следното условие



Фиг. 2. Принцилна схема на развитие на обрушаването във височина
1 – контур на рудното тяло; 2 – обрушени скали; 3 – руден масив; 4 – контур на обрушеното пространство

$$h_{cp} = \frac{\left\{ \frac{H^2}{2} (\cot g\beta + \cot g\gamma) + MH + [H(\cot g\beta + \cot g\gamma) + M]^2 k_1 \right\} (K_p - 1) - MhK_p}{a_{cp}} \quad (3)$$

Състоянието на обрушеното пространство се определя с параметъра $\Delta h = H - h_{cp}$. Ако $\Delta h = 0$, следва, че е настъпило подпиране на отгоре лежащите скали за сметка на коефициента на разбухване K_p и процесът на развитие на обрушаването във височина затихва. Ако $\Delta h > 0$ няма пълно подпиране. Съществува празно пространство между обрушените скали и оформилия се свод на естествено равновесие. Ако $\Delta h < 0$ задачата не е поставена коректно. Съществува преоразмеряване или входните параметри, заложени в модела, не съответстват на реалността. За системата с подетажно обрушаване най-често е изпълнено условието $\Delta h > 0$. Това се обяснява с факта, че динамиката на отбиването и източването на рудата е по-голяма от развитието на обрушаването във височина. Горните разсъждения показват, че при моделиране на обрушаването във височина задължително трябва да се отчетат както образувалите се в началния момент празни пространства, така и наличието на сипеца среда от обрушени скали. Тя създава отпор в страничните скали и по този начин влияе върху общото състояние на добивното пространство. Тази концепция се поддава много добре на моделиране с МКЕ, тъй като в детайли може да се установи поведението на среди с различни физико-механични свойства.

При моделиране развитието на минните работи в блок 150 с помощта на МКЕ се забелязва, че обрушаването на повърхността е отместено по отношение на рудното тяло. Освен това, ключовият елемент на свода се намира на определена дълбочина под разрушената зона, формирана още при моделиране на ненарушената среда. С това обстоятелство може да се обясни фактът, че между обемите на издетата руда и формиралата се фуния на обрушаване на повърхността няма съответствие. Опитът показва, че големината на ключовия елемент на свода, неговото местоположение, както и критичният момент на разрушаването му могат много добре да се моделират с помощта на МКЕ. Достатъчно точни индикации за началото на взаимно

$$(S_o - S_p)K_p - [S_p + (S_o - S_p)] = a_{cp} h_{cp} \quad (1)$$

След несложни преобразования се получава

$$\frac{S_o(K_p - 1) - S_p K_p}{a_{cp}} = h_{cp} \quad (2)$$

Търсеното решение има смисъл в интервала $[0, H]$. Ако се отчетат ъглите на движение на скалите в горнището и долнището на рудното тяло, съответно β и γ и се приеме, че сечението на свода на естествено равновесие $S_{св}$ се определя от произведението $k_1 l^2$, където l е ширината на подсеченото пространство (в случая $l = H(\cot g\beta + \cot g\gamma) + M$), а k_1 определя вида на свода (едноцентров, трицентров), окончателно може да се запише

влияние между нарушената зона на повърхността и развитието на обрушаването във височина са характерните пукнатини на повърхността, скоростта на тяхното "отваряне", ориентацията им спрямо елементите на залягане на рудното тяло. Рудничните наблюдения са основният източник на тази информация. Тя е необходима при изграждане на адекватен модел на този особено важен етап от развитието на обрушаването във височина.

Оценка на взаимното влияние на подетажните изработки

Характерна особеност при разработване на щокове е използването на панелни изработки за пробиване на взривните сондажи и последвалото източване и натоварване на рудата. Тези изработки се намират на определено разстояние една от друга и несъмнено взаимно си влияят. Задачата се свежда до минимизиране на тяхното влияние при спазване на ограничаващите условия, свързани с изличането на рудата от добивното пространство. Като изходно начало при определяне на натоварването върху масива се използва обстоятелството, че върху него лежи стълб обрушени скали, т.е. хипотезата за геостатичния товар е неприемлива. От тази гледна точка условията за натоварване могат да бъдат зададени със следните изрази [2]

$$P'_y = \frac{\gamma \rho}{kf} \left(1 - e^{-\frac{kfy}{\rho}} \right) \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\rho}{kfy} \left(1 - e^{-\frac{kfy}{\rho}} \right)$$

$$P'_x = \eta \gamma k \quad (5)$$

където P'_y е вертикалното налягане на обрушените скали;

P'_x - хоризонталното налягане на обрушените скали;

P – периметърът на хоризонталното напречно сечение;

F – площта на хоризонталното сечение;

k – коефициентът на страничния отпор;

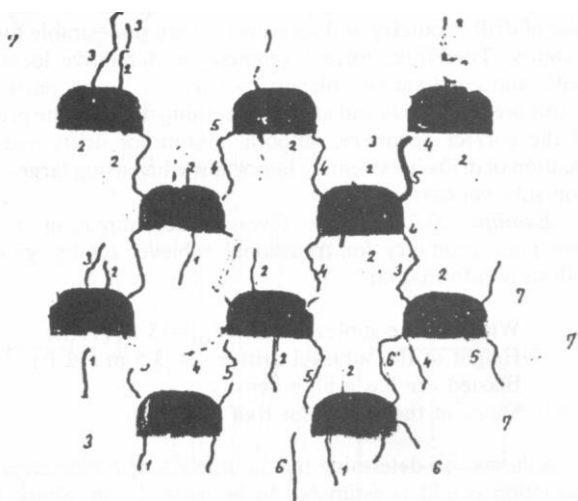
f – коефициентът на триене;

γ – плътността на обрушените скали;

ρ – хидравличният радиус, $\rho = F/P$;

y – текущата координата.

Компонентите, характеризиращи напрегнатото състояние са ориентирани строго по осите на координатната система (ХОУ). В случая няма основание да се търси предпоставка за тяхното отклонение. Масивът, намиращ се непосредствено до подготвителните изработки, практически е разтоварен от действащите напрежения, съответстващи на нарушената среда. Върху състоянието на подготвителните изработки оказват влияние формата и големината на напречното им сечение. Използването на високопроизводителна пробивна и товаро-доставъчна механизация изисква изработки с голямо напречно сечение (над 16 m²). Изборът на форма на напречното сечение има отношение към режима на източване (формиращите се елипсоиди на източване и разбухване) и най-вече към устойчивостта на изработките през периода на тяхното използване. Сравнително неговият натоварване съгласно изрази (4) и (5) са основание за използване на правоъгълно напречно сечение или свод с минимална височина. На фиг.3 е показана принципна схема на разпределението на нормалните напрежения около подготвителните изработки при предварително зададен режим на натоварване. Решението е получено с помощта на МКЕ [1]. Предимството на компютърното моделиране в случая е възможността за многократно симулиране на дадена ситуация при изменение на геометрията на конструкцията и механичните свойства на средата.



Фиг. 3. Зони на разрушаване между подетажните изработки (по [1])

Влияние на временните открити пространства върху конструкцията на системата

Като морфологична даденост щокът се отличава с голяма степен на изменчивост на площта на хоризонталните сечения. Същевременно те са основните повърхнини, които оконтуряват запасите във всеки подетаж. При последователното развитие на минните работи в дълбочина не са рядко случаите, когато площта на даден подетаж значително се увеличава в сравнение с предшестващия. Тогава неизбежно част от добивните работи се извършват "под целик". Създават се открити пространства, които не съответстват на същността на подетажното обрушаване и сами по себе си се явяват източници на значителна концентрация на действащите в масива напрежения. Ако добивните работи се извършват с голяма интензивност е възможно откритите пространства по височина да достигнат размерите на два и повече подетажа. Такава ситуация изисква детайлно изучаване на разпределенията на напреженията през отделните етапи – от момента на образуване на празното пространство до неговото ликвидиране чрез запълване с отгорележащите обрушени скали. Задачата е поставена за условията на блок 150 в рудник "Челопеч". С помощта на МКЕ е изследвано напрегнатото и деформирано състояние на масива около добивните изработки, които в случая са моделирани като открити пространства. Забелязва се значителна концентрация на напрежения в петите и по-конкретно там, където предстои прокарването на подготвителните изработки за следващия подетаж. Тенденцията на формиране на зони с повишена концентрация на напрежения още по-категорично се налага при увеличаване на откритото пространство, съответстващо на развитието на минните работи под хор 405 m. Следва да се подчертае наличието на значителни тангенциални напрежения в стените на откритото добивно пространство. Съществено в случая е, че в зоната на тангенциалните напрежения попадат изработки от основната инфраструктура на рудника (вентилационни, транспортни, спомагателни). Неблагоприятното съчетание на срязващите напрежения с тектонската нарушеност на масива може да доведе до рязко влошаване на състоянието на тези изработки, което на практика означава невъзможност за безопасна експлоатация. Посочените данни за геомеханичното състояние на масива около добивните изработки представят един от аспектите на подетажното обрушаване, на който сравнително малко внимание се отделя в литературата. Разработването на щокове показва, че развитието на минните работи "под целик" довежда до съществено изкривяване на същността на подетажното обрушаване, което е предпоставка за сериозни негативни последици. Основната препоръка в случая е добивните работи на даден подетаж да се развиват в такъв порядък, който да осигури непосредственото навлизане на обрушените скали от горните подетажи във възможно най-кратки срокове.

Заклучение

Високата степен на механизация при извършване на основните производствени процеси превръща системата с подетажно обрушаване в една от най-производителните

технологии в подземния рудодобив. Тя обаче притежава съществени недостатъци, поради което не се възприема еднозначно в практиката. Дългогодишното прилагане на подетажно обрушаване в рудник "Челопеч" показва, че голямата степен на изменчивост на природните условия влияе най-съществено върху ефективността на добивните работи. По-конкретно формират се група фактори, които могат да се подведат под общия знаменател "геомеханични аспекти". Това са I напрегнато състояние на ненарушения масив; II механизъм на формиране на обрушаването като природен феномен; III взаимно влияние на подготвителните изработки за източване, натоварване и доставка на рудата; IV формиране на временни открити пространства (работа под целик). Необходимостта от системен подход при тяхното изучаване е повече от очевидна. Изключителната сложност на организация и провеждане на експерименти в реални руднични условия поставя като приоритетна задача използването на принципите на моделирането и по-конкретно на математическото моделиране. Анализът на получените резултати показва, че МКЕ е в състояние да решава задачите, свързани с геомеханичните аспекти на системата с подетажно обрушаване. Ефектът от неговото приложение значително се увеличава, когато се използва собствен програмен продукт. Той дава възможност за детайлизиране, анализ и оценка на избрана област (елемент, възел) от изчислителната схема. Систематичното изучаване на факторите, изведени като геомеханични

аспекти, несъмнено ще даде възможност за по-успешно прилагане на варианти и технически решения, чрез които системата с подетажно обрушаване ще запази своята конкурентна способност при разработване на руди на цветни метали.

Литература

- SME Mining Engineering Handbook. 2nd Edition, Volume 2. Senior Editor Howard L.Hartman. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado.1992, p.2260.
- Михайлов, Г. Геомеханични аспекти на системата с магзиниране при подземно разработване на рудни находища. Минно дело и геология.2002,5, с.39-43.
- Иванов, В. Физико-механични характеристики на скалите, изграждащи покриващия масив на находище "Челопеч". Годишник на МГУ"Св.Иван Рилски"-София. Св.тък II Добив и преработка на минерални суровини, том 47. 2004, с.135-140.
- Иванов, В. Якостни и деформационни характеристики на скалите по проектното трасе на наклонена шахта за рудник "Челопеч". Годишник на МГУ"Св.Иван Рилски"-София. Св.тък II Добив и преработка на минерални суровини, том 47. 2004, с.129-133.

Препоръчана за публикуване от
Катедра "Подземно разработване на полезни изкопаеми", МТФ