

Числено моделиране и оценка на устойчивото състояние на открити добивни пространства, създадени в резултат на подземни минни работи (за условията на рудник "Кошава")

Георги Трапов, Георги Михайлов

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

РЕЗЮМЕ. Част от подземните минни изработки след изчерпване на запасите в дадено руднично поле остават като открити добивни пространства. Възникват алтернативи за тяхното повторно използване за други технологични нужди или се налага да се оценява потенциалната опасност от внезапно обрушаване, предизвикващо аварии на повърхността или в съседни рудни полета.

Представя се процедура за изследване на напрегнатото и деформирано състояние на масива около добивните изработки с помощта на Метода на крайните елементи. Решава се нелинейната задача, като се отчита структурната нарушеност на масива. За оценка на устойчивото състояние се предлага количествен показател на критерия на разрушаване на Mohr-Coulomb, наречен safety factor. Анализът на устойчивото състояние и оценката за възникване на аварии в съществуващите минни изработки се основава на вероятностния подход, благодарение на който се оценява равнището на риска при вземане на окончателно технологично решение.

NUMERICAL MODELLING AND STABILITY ASSESSMENT OF OPEN STOPES RESULTING FROM UNDERGROUND MINING OPERATIONS

ABSTRACT. Part of the underground mining excavations after the complete extraction of the reserves in a mining field remains as open stopes. There are alternatives for their re-use for other technological requirements or a need arises for assessing the potential hazard of sudden caving causing accidents on the surface or in neighboring mining fields.

A procedure is presented for investigating the rock mass stressed and strained state around the stopes by means of the Finite Element Method. A non-linear problem is solved by taking into account the rock mass discontinuity. A quantitative index of Mohr-Coulomb's failure criterion, called 'safety factor' is proposed for assessing the stability. The stability analysis and the accident occurrence assessment in the existing mining excavations are based on the probability approach that helps to evaluate the risk level in making the final technological decision.

Въведение

Гипсовото находище "Кошава" е основата, върху която се развива рудник "Кошава" - единственият рудник за подземен добив на гипс у нас.

Основната система на разработване, която се прилага в рудник "Кошава" повече от 40 години е камерно-стълбова система. Тя има различни модификации. Използван е различен ред на развитие на минните работи. Следва дебело да се подчертае, че геомеханичните аспекти на системата на разработване са най-сериозният фактор за осигуряване на ефективни показатели. От тази гледна точка в конкретното изследване се залага на създаване на адекватен математичен модел, с помощта на който да се осигури възможност за анализиране и избор на оптимални параметри. Моделирането се основава на Метода на крайните елементи като за целта е използван собствен програмен продукт.

Съставяне на геомеханичен модел

Методът на крайните елементи (МКЕ) реализира числено решаване на диференциалните уравнения, характеризиращи състоянието на масива при натоварване. МКЕ дава възможност да се моделира нееднородността и анизотропността на средата. В зависимост от вида на интерполационните полиноми, апроксимиращи преместванията на точките, може да се използват различни видове елементи: триъгълници, правоъгълници, четириъгълници. МКЕ се из-

ползва при решаване и на пространствени задачи. Тогава вместо равнинни фигури се използват пространствени тела. Голямо предимство на МКЕ е възможността за решаване на еластични и еласто-пластични задачи. Основен момент при решаване на задачите по МКЕ е съставяне на изчислителна схема и определяне на граничните условия. В някои случаи, при решаване на задачи, свързани с устойчивостта на подземни изработки се съставят изчислителни схеми, отчитащи терена на повърхността. В други случаи, ако предварително е известно напрегнатото състояние на ненарушения масив и посоката на главните напрежения, изчислителната схема може да се детайлизира, така че да се получи решение на изследвания параметър в повече точки. Съществуват програмни продукти за автоматично генериране на мрежата в изчислителната схема. В други случаи за тази цел се използват човеко-машинни процедури.

В конкретния случай е използван собствен програмен продукт за решаване на задачи по МКЕ – програмната система FIEL. Алгоритъмът за съставяне на матрицата на коравината на системата предвижда използване на неограничен брой възли и елементи. Практиката показва, че оптималният брой на възлите за получаване на устойчиво решение е $1000 \pm 10\%$. При съставяне на геомеханичния модел се обръща особено голямо внимание на отчитане на нееднородността на средата. Данните от геоложката характеристика на находище "Кошава" дават основание за такъв подход. С цел установяване на влиянието на целия скален комплекс върху натоварването на камерите и цели-

ците е целесъобразно да се състави модел, включващ терена на повърхността т.е. отчита се цялата дълбочина на разработване. Съставянето на геомеханичния модел следва да предвижда изготвяне на по-подробни изчислителни схеми с оглед осигуряване на по-детайлна картина на разпределение на изследваните параметри. Отчитайки физико-механичните свойства на гипсовата скала, получени в лабораторни условия, геомеханичният модел следва да решава задачата в зоната на нелинейните зависимости между напрежения и деформации. Не на последно място геомеханичният модел следва да осигури възможност за обратен анализ т.е. на базата на натрупаните наблюдения в подземни условия и на повърхността, както и на регистрираните досега провадания в рудника, да се търси възможност за определяне на якостните и деформационни показатели в масива. Обект на изследването е определянето на параметрите на камерно-стълбовата система на разработване в условията на 200 метровата зона, намираща се западно от 190^A галерия, която допълнително беше включена към границите на рудничното поле на рудник "Кошава".

Решението на задачата се извършва в условия на равнинно-деформирано състояние. Използваният подход за съставяне на изчислителните схеми в множество разрези позволява да се получи пространствено решение на задачата, аналогично на това при използване на пространствени елементи.

Постановка на задачата

Основното уравнение на МКЕ се записва във вида

$$\{F\} = [K]\{U\}$$

където $\{F\}$ е матрицата стълб на силите, приложени във върховете на елементите;

- $[K]$ – обобщената матрица на коравината на системата;
- $\{U\}$ – матрицата стълб на компонентите на преместванията на върховете на елементите.

Матрицата на коравината на системата $[K]$ се определя от геометричните характеристики на възлите, включително и от техните координати, а така също и от деформационните характеристики на разглежданата среда.

Определянето на матрицата на коравината на системата може да стане по различен начин. Относително най-простият и същевременно най-разпространен е този, при който се определя матрицата на коравината на отделните елементи $[K_e]$ и след това нейните членове по известни правила се адресират към матрицата на коравината на системата $[K]$.

Решаването на нелинейната задача се явява задължително условие при изследване на напрегнато и деформирано състояние на масива около добивните изработки за условията на рудник "Кошава". За основа на изчислителния процес се използва линейната задача и якостните и деформационни характеристики, получени въз основа на най-новите изследвания [Колев и др., 2003]. Първоначалната постановка на задачата с използване на условието за пределна големина на натисковите напрежения $\sigma_{пред} = 0,7 \sigma_n$, където σ_n е якостта на едноосов натиск, определена в лабораторни условия се оказва неподходяща. В практиката за решаване на нелинейната задача съществуват мно-

жество подходи, но в крайна сметка те могат да се систематизират в три групи:

- метод на променливата коравина;
 - метод на началните напрежения;
 - метод на началните деформации.
- Нека се приеме че при условие

$$\sigma \leq \sigma_0 \quad (1)$$

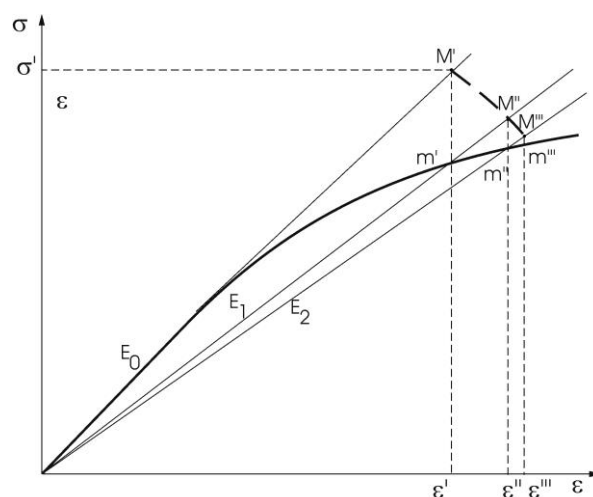
деформирането на тялото до се подчинява на линейния закон

$$\{\sigma\} = [E_0]\{\varepsilon\}, \quad (2)$$

а когато условие (1) не е изпълнено деформирането на тялото следва нелинейния закон

$$\{\sigma\} = f(\{\varepsilon\}) \quad (3)$$

Определянето на напрегнатото и деформирано състояние на средата с нелинейни характеристики съгласно условие (3) налага използването на итерационна процедура. В конкретния случай е използван методът на променливата коравина.



Фиг. 1.

На фиг.1 е показан принципният подход за използване на тази процедура. Най-напред се решава еластичната задача с модул на еластичност E_0 , съответстващ на началното състояние на елемента. Извършва се проверка и ако се окаже, че условие 1 не е изпълнено, в смисъл напреженията излизат извън пределите на линейния участък, се извършва следната последователност от действия. Вземайки за базова точка полученото първо решение на еластичната задача за $\{\varepsilon'\}$, съгласно уравнение (3) се определя съответната величина на напреженията в нелинейния елемент – т.е определя се точката m' (вж.фиг.1). Ако разликата $(M'-m')$ е по-голяма от предварително зададена величина, съответстваща на необходимата точност на решението, точката M' с координати σ' и ε' не съответства на реалните свойства на тялото и следва провеждане на втората итерация. Отново се решава еластичната задача, но при съставяне на матрицата на коравината на елементите,

за които не е изпълнено условие (3), вместо модула E_0 се въвежда секущият модул E_1 . Паралелно с E_1 се изменя и коефициентът на Поасон μ . След втората изчислителна процедура на линейната задача се получава точката M . Следващата итерация става по вече описания път. Изчислителният процес продължава докато се достигне такава близост на точките M^n и m^n , за която е изпълнено предварително зададеното условие на необходимата точност.

Алгоритмизацията на схемата за реализиране на изчислителния процес предвижда последователна проверка на всички елементи. В зависимост от големината на натоварване се променя броят на елементите, за които се налага изменение на стойностите на E_n на съответната итерация. Така описаната процедура за реализиране на нелинейната задача е използвана при решаване на целия комплекс от задачи, свързани с определяне на параметрите на камерно-стълбовата система за условията на 200 метровата зона – участък № 9. Въз основа на получените решения е изготвен работният проект, по който се изземват запасите, т.е. практическата реализация е налице.

Определянето на параметрите на камерно-стълбовата система на разработване има пряко отношение към оценката на устойчивото състояние на конструктивните елементи: камерите, целиците, непосредственото горнище, долнището, връзките на камерите с подготвителните изработки. Определянето на характера на разпределение на напреженията с помощта на МКЕ е първият етап в решаването на задачата за намиране на параметрите на камерно-стълбовата система. Не по-маловажен е вторият етап – оценката на устойчивото състояние на конструктивните елементи на системата на разработване. За целта е необходимо да се използват подходящи критерии за оценка. Световната практика показва, че са известни множество критерии, като особено важно е да се отбележи, че различните критерии реагират по различен начин, т.е. няма универсален критерий, с който да се оцени устойчивото състояние, независимо какви са скалите, в които е изградено даденото съоръжение.

Авторите на тази разработка използват главно критериите на Mohr Coulomb (M-C), Hoek-Brown (H-B), модифициран критерий (MOD). Първите два са широко известни в литературата. Модифицираният критерий е собствена разработка. Той се основава на отношението между задържащи и свличащи сили и е особено подходящ при оценката на устойчивото състояние на съоръжения, прокарани в здрави, но напукани скали.

В настоящата разработка е възприет подход, основаващ се на критерия на Mohr Coulomb с допълнително развитие, въз основа на което устойчивостта се оценява с параметъра SF (safety factor). Съставя се функция от вида $SF=f(t)$, където $t=A\sigma_1+B\sigma_2$ е аргумент, описващ напрегнатото състояние на масива в дадена точка; A, B са константи; σ_1, σ_2 са главните напрежения. По този начин вместо зависимостта $\tau=F(\sigma)$ се използва $SF=f(t)$, което не е новост за световната практика. След несложни преобразувания функцията $SF=f(t)$ може да се преобразува така, че:

$SF>1$ означава устойчиво състояние;

$0<SF<1$ означава разрушаване.

Естествено, когато $SF \gg 1$ конструкцията притежава висока степен на устойчивост. Следователно, показателят SF може да се използва и при количествено сравняване на два и повече варианта на изменение на параметрите на системата на разработване.

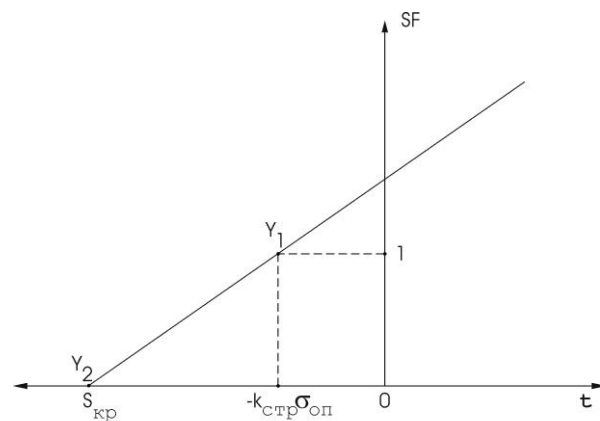
На фиг. 2 е показана принципната схема за оценка на устойчивото състояние с помощта на показателя SF . Като се вижда зависимостта $SF=f(t)$ е линейна. Това налага намирането минимум на две точки за нейното построяване. Това са точките Y_1 и Y_2 , чиито координати са:

$$Y_1 = (-K_{стр}\sigma_{оп}, 1);$$

$$Y_2 = (S_{кр}, 0).$$

В случая:

- $\sigma_{оп}$ - якост на опън, определена в лабораторни условия;
- $K_{стр}$ - коефициент на структурно отслабване или коефициент, отчитащ мащабния ефект при преминаване от лабораторни в натурни условия;
- $S_{кр}$ - характеризира разрушаването в условия на сложно напрегнато състояние; преминаването към едноосов натиск е възможно, когато константите A и B са съответно $A=1; B=0$.



Фиг. 2.

Гаранция за успешно прилагане на SF в изследователски проекти е реалното залагане на величините $K_{стр}, \sigma_{оп}, S_{кр}$. В конкретния случай са използвани данни от други изследвания (най-вече триаксиални изследвания), данни от регистрирани нарушения и пропадания в рудник "Кошава", които следва да се разглеждат като натурен експеримент.

При тази постановка на задачата (вж. фиг. 2), когато t се изменя в интервала $[S_{кр}, -K_{стр}\sigma_{оп}]$ следва, че $SF<1$, т.е. регистрира се разрушаване; $SF>1$, т.е. конструкцията е в устойчиво състояние, когато $t>-K_{стр}\sigma_{оп}$.

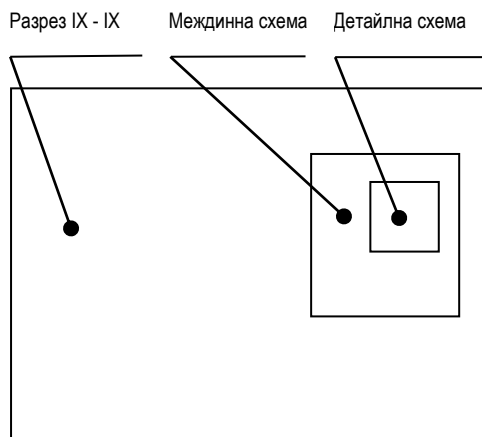
Решаването на задачата за определяне на оптималните параметри на добивната технология за условията на 200 метровата зона – участък № 9 се основава на подход, съчетаващ постепенно приближаване на изчислителната схема до разглеждания участък.

Би било подходящо това да се нарече Метод на пълзящата изчислителна схема. Целта на подобна реализация на решението по метода МКЕ е постепенно да се намалява мащабът на разглеждания сектор, което осигурява много голяма детайлност на представянето на различните конструктивни параметри на системата на разработване. Същевременно, всяка предишна реализирана вече схема се

явява базата, формираща началните условия за следващата. По този начин се достига до изходна схема, представляваща конкретен разрез от документацията на рудничното поле. Нейната представителност изисква използване на дребен мащаб, но по описания ред не е проблем чрез използване на Метода на пълзящата изчислителна схема да се достигне до необходимите за всеки конкретен случай детайли.

На фиг. 3 е показана конфигурацията на този подход при решаване на задачата за 200 метровата зона – участък № 9.

В случая чрез избрания Метод на пълзящата изчислителна схема изследователят има възможност да насочи своето внимание към строго определена зона, в която да бъде изградена мрежата на базата на неговото субективно желание. В конкретния случай това са стените, пода и тавана на добивните камери. Налице е една ръчно-машинна процедура, съчетаваща в себе си елементи на автоматично генериране на мрежата с ръчно избиране на детайлната изследвана област.



Фиг. 3.

Обект на изследователската дейност са следните изчислителни схеми:

- изчислителна схема "напречен разрез IX-IX";
- изчислителна схема "надлъжен разрез В-В";
- междинна изчислителна схема;
- детайлна изчислителна схема.

Изчислителната схема "напречен разрез IX-IX" е направена по напречен разрез IX-IX от документацията на рудник "Кошава". Тя съдържа 378 възела ($N_b=378$) и 676 триъгълни елемента ($N_{el}=676$). С нейното изграждане се цели да се установи какво е влиянието на нееднородността на средата, наклона и дебелината на отделните литоложки разновидности, характера на терена на повърхността.

Изчислителната схема "надлъжен разрез В-В" е направена по надлъжен разрез В-В от документацията на рудник "Кошава". Тя съдържа 490 възела ($N_b=490$) и 884 триъгълни елемента ($N_{el}=884$). С нейното изграждане се цели да се установи какво е влиянието на съществуващите минни работи върху 200 метровата зона – участък №9.

Разработването на изчислителна схема "Междинна" се наложи заради обстоятелството, че изследваният участък заема голяма площ. Това изисква използване на сравнително дребен мащаб на моделиране, който от своя страна

не позволява да се навлезе в детайли на конструктивните елементи на камерно-стълбовата система. Целта на изчислителната схема е да се установи влиянието на добивните работи в участък с едновременно разработване на 7 камери, като изземването става на ленти с височина 4 m. Влиянието на минните работи се оценява с наличието на зони на концентрация на напрежения, респ. зони на разтоварване, чиито размери зависят от формите и големината на напречното сечение на камерите и целиците. Наличието на обективно съществуващ прототип на модела дава възможност да се оцени доколко той (моделът) съответства на реалните условия. Налице е предпоставка за обективна оценка, благодарение на обратния анализ, който може да се извърши на базата на данните от маркшайдерската наблюдателна станция, отчитаща преместванията и деформациите в камера 39 и камера 40.

Изчислителна схема "Детайлна" е изградена на базата на изчислителна схема "Междинна". Тя е основа за по-нататъшните изследвания, свързани с прилагането на оптимален вариант на камерно-стълбовата система на разработване. Начинът на нейното изграждане отчита специфичните особености на вече създадените добивни пространства, нееднородността на масива, ъгъла на наклона и дебелината на пласта, характера на терена на повърхността, тектонските нарушения и др.

Изчислителна схема "Детайлна" се състои от 1044 възела ($N_b=1044$) и 1938 триъгълни елемента ($N_{el}=1938$).

Анализ на получените резултати

Основните параметри, включени в анализа на напрегнатото състояние на ненарушения масив са:

- разпределение на главните напрежения σ_1 и σ_2 ;
- разпределение на тангенциалните напрежения τ_{xy} (във вертикалната равнина xOy);
- ъгъл на наклона α на максималното главно напрежение σ_2 спрямо хоризонталната равнина.

Относително равномерно е нарастването на максималните главни напрежения σ_2 с увеличаване на дълбочината. Минималните главни напрежения имат по-неравномерен характер на изменение, поне що се касае до зоната, в която заляга гипсовия пласт. И в двата случая може да се каже, че напреженията нарастват пропорционално с увеличаване на дълбочината и се приближават по стойност до геостатичния товар. Същевременно следва да се отбележи, че са налице тангенциални напрежения. Тяхната стойност се колебае между 2×10^4 Pa и 6×10^4 Pa. Налице е отклонение на максималното главно напрежение σ_2 от вертикалната равнина. Прави впечатление, че ъгълът α е по-голям от 90° почти за цялата изчислителна схема.

Всичко това следва да покаже, че въпреки стойностите на максималното главно напрежение σ_2 да съответстват на геостатичния товар γH , **няма основание да се приеме хипотезата за геостатичния товар**, тъй като се наблюдават тангенциални напрежения τ_{xy} и ъгълът $\alpha \neq 90^\circ$.

Сравнявайки характера на разпределение на изследваните величини се установява, че съществуващите минни работи оказват влияние върху напрегнатото състояние на ненарушения масив. Образува се зона на опорен натиск, която неизбежно възниква около добивните изработки. От тук следва същественият извод, че при развитие на минните работи в 200 метровата зона – участък № 9 **задъл-**

жително трябва да се оцени влиянието на съществуващите минни изработки североизточно от 190А галерия.

С помощта на "междина изчислителна схема" е моделирано поведението на масива при разработване на седем камери: к.32, к.33, к.34, к.35, к.36, к.37 и к.38. Избран е подход, чрез който най-напред се моделира напрегнатото състояние на ненарушения масив. Използвани са машинни графики, с които се илюстрира разпределението на следните параметри:

- хоризонтални напрежения σ_x ;
- вертикални напрежения σ_y ;
- тангенциални напрежения τ_{xy} в равнината (xOy);
- коефициент на устойчивост SF.

Следва да се отдели специално внимание на коефициента на устойчивост SF. Според графиката на неговото разпределение той се движи в невисоки граници. Това води до съществения извод, че **за условията на Кошава не е възможно с помощта на камерно – стълбова система на разработване да се постигне висок коефициент на извличане**. Зоната с понижени стойности на хоризонталните напрежения σ_x много отчетливо се забелязва. Тя се дължи на по-малката коравина на скалите в горнището. На този етап трудно може да се оцени до колко това е благоприятно начално условие за развитие на добивните работи, но причината за съществуване на такава зона следва да се обясни със силно изразения характер на нееднородност на скалите, изграждащи изчислителната схема.

Анализът на този етап на моделиране на минните работи **не дава основание да се приеме**, че при комбинация от седем камери се образува свод на естествено равновесие, въпреки че ширината на добивното пространство е 180 m.

Липсата на свод на естествено равновесие налага в следващия етап - при "детайлна изчислителна схема" да се разглеждат едновременно само три камери с оглед получаване на резултати в повече на брой точки.

Разтоварените зони над добивните камери тук по-отчетливо се забелязват. Анализирайки съвместното разпределение на вертикалните и хоризонталните напрежения (σ_y и σ_x) се стига до извода, **че поведението на масива около добивните камери следва да се основава на т.н. постилащ ефект**. Характерно за него е, че при деформациите на отделните слоеве се получава своеобразно огъване над добивните камери. Дебелината на отделните слоеве осигурява устойчивостта на откритите пространства. В един момент тя (устойчивостта) може рязко да се влоши при наличие на стръмно-залягащи пукнатини или в случай, че отделните слоеве станат прекалено тънки. Липсата на свод на естествено равновесие над добивните пространства за сметка на постилащия ефект, както и качественото изменение на SF следва да покаже, че височината на камерите H_k оказва влияние върху устойчивостта на системата камера – целик и тя трябва в по-нататъшните изследвания да се оцени детайлно.

При "Детайлна изчислителна схема" е изследвано напрегнатото състояние около добивните изработки при следната ширина на МКЦ: $B_c=10, 16, 18, 20, 22$ m. Моделирани са общо пет случая на ширина на целиците, като всеки случай има две подусловия при $H_k=7$ m; $H_k=10$ m. По този начин са формирани общо 10 варианта. За всеки вариант са съставени следните машинни графики:

- разпределение на хоризонталните напрежения σ_x ;
- разпределение на вертикалните напрежения σ_y ;

- разпределение на тангенциалните напрежения τ_{xy} в равнината (xOy);

- разпределение на показателя SF.

Анализът на разпределението на напреженията и показателя SF за отделните варианти на камерно стълбовата система на разработване е направен при реализация на нелинейната задача. Изчислителният процес се извършва в условие на итерационен режим.

Постилащият ефект, който беше описан при анализа на "междина изчислителна схема" при височина на камерите $H_k=10$ m по-отчетливо се забелязва в сравнение със случая $H_k=7$ m. Вариант с ширина на междукamerните целици $B_c=16$ m е неприемлив, поради значителните зони, обхванати от разрушения, т.е. $SF<1$. Налице е още един важен феномен – участък със загуба на устойчивост се появява **не само на контура с откритите пространства, а и във вътрешността на масива**. Тук трудно може да се посочи кога и какъв по големина инициатор би предизвикал и би развил това нарушение във височина.

Разпределението на хоризонталните напрежения σ_x вертикалните напрежения σ_y , тангенциалните напрежения τ_{xy} и показателя SF при варианта $B_c=18$ m, $H_k=7$ m следва да се оцени като благоприятно. Образува се зона на концентрация на напрежения само в непосредствена близост до вертикалните стени на камерата. Разтоварената зона в тавана на камерите има по-малки размери. По-равномерно е разпределението на хоризонталните напрежения σ_x . Около добивните изработки са регистрирани незначителни участъци на разрушения. Те са напълно съизмерими с очакваните нарушения на масива, които могат да настъпят заради сеизмичния ефект от ПБР. Не бива да се пренебрегва коефициентът на запаса, който е заложен при извеждане на израза за SF. Това се отнася преди всичко до определяне на $S_{кр}$ и $K_{стр}$. При решаване на различните варианти за условията на "детайлна схема" са взети под внимание най-ниските стойности на тези параметри. Освен това, така регистрираните разрушавания не могат да имат повсеместен характер, а локалните нарушения могат да се неутрализират с използваните в рудника конструкции и параметри на анкерен крепеж.

При ширина на междукamerните целици $B_c=18$ m и височина на камерата $H_k=10$ m характерът на разпределение на напреженията е твърде сходен със случая, когато $B_c=18$ m и $H_k=7$ m. По-неравномерният характер на разпределение на вертикалните напрежения σ_y следва да се обясни с височината на стените на камерата. Необходимо е да се отбележи, че в практиката един от често срещаните случаи на отслояване е от стените на камерите, като техния брой е право пропорционален на височината на камерата. Приема се, че регистрираните случаи на разрушаване ($SF<1$) са с незначителна площ и не могат да окажат съществено влияние върху устойчивостта на системата камера - целик. Аргументите в полза на това твърдение бяха изтъкнати при разглеждане на предишния случай: $B_c=18$ m, $H_k=7$ m. Не може да не се изтъкне фактът, че височината на камерата H_k оказва съществено влияние върху степента на устойчивост.

За основа на анализа на разпределение на хоризонталните напрежения σ_x , вертикалните напрежения σ_y , тангенциалните напрежения τ_{xy} и параметъра SF при ширина на целика $B_c=20$ m и височина на камерите $H_k=7$ m и $H_k=10$ m са използвани съответните машинни графики. Сходството

в характера на разпределение на напреженията σ_x , σ_y , τ_{xy} е очевидно. Постилацият ефект, за който вече стана дума, запазва параметрите на провисване над камерите и при двете височини $H_k=7$ m; $H_k=10$ m. При такава геометрична конфигурация ролята на височината на камерата H_k започва да намалява. Това е логично. Целиците работят в условие на обемно напрегнато състояние – отношението H_c : $B_c < 1$ и това се отразява върху устойчивостта на страничните стени на камерите. Машинните графики, характеризиращи разпределението на показателя SF и за двата случая $H_k=10$ m и $H_k=7$ m са идентични. Нещо повече, те са твърде близки до графиките, характеризиращи SF при $B_c=18$ m.

За условията на находище Кошава при използване на лентообразни целици, характерът на разпределение на напреженията около добивните изработки и показателя SF **не се изменя съществено** след определена дебелина на целиците при височина на камерата $H_k=7$ m $H_k=10$ m. Този извод има важно практическо значение. Той показва, че от гледна точка на геомеханичните процеси **лентообразни целици с ширина $B_c > 20$ m не е необходимо да се прилагат в рудник “Кошава”**. Това не изчерпва въпросът за устойчивите размери на конструктивните параметри на камерно-стълбовата система. Фактори като ъгълът на наклона, височината на камерата, състоянието на скалите в горнището и долнището, формата на напречното сечение на камерите задължително следва да се анализират и отчитат при всяка конкретна ситуация на прилагане на камерно-стълбовата система.

Заклучение

Извършените изследвания за определяне на параметрите на системата на разработване при изземване на запасите северно от панелна галерия №3, експлоатационен участък №9 на рудник “Кошава” дадоха основание да се направят няколко основни извода.

При определяне на напрегнато състояние на ненарушения масив няма основание да се използва хипотезата за геостатичния товар – необходимо е предварително да се извършват натурни измервания за определяне на компонентите на началните напрежения в масива.

Анализът на напрегнатото и деформирано състояние на масива около добивните изработки, извършен въз основа на “междина изчислителна схема” показва, че при едновременно разработване на група камери разтоварващ ефект над централните камери се проявява, но той не може да се обясни с формиране на свод на естествено равновесие. Слоестата текстура на скалите в горнището е предпоставка за възникване на т.н., “постилащ ефект”, което означава, че натоварването на всяка камера следва да се разглежда само за себе си!

При изследване на напрегнатото и деформирано състояние на масива около добивните камери е целесъобразно да се използва методът на “пълзящата изчислителна схема”. Този подход дава възможност за детализация на изследвания обект в степен, която да задоволи конкретните изисквания.

Машинните графики, характеризиращи показателя SF за нарушения масив показват, че за условията на находище Кошава при използване на камерно-стълбова система на разработване не може да се постигне висок коефициент на извличане.

С помощта на детайлна изчислителна схема са разглеждани варианти на камерно-стълбова система с изменение на ширината на целиците в диапазона $B_c = 10, 16, 18, 20, 22$ m. Доказва се, че в по-нататъшните изследвания ефективността на камерно-стълбовата система на разработване следва да се разглежда само в тези граници.

Предложени са конкретни параметри на камерно-стълбовата система на разработване в участък №9: ширина на целиците 18 m; височина на горнището $h_r = 3$ m; дебелина на долнището $h_d = 2$ m; лентообразни целици при дължина на камерата $L_k = 100$ m. За предпочитане е целиците да не се пресичат от изработки.

В процеса на работа над изследователската задача за определяне на параметрите на камерно-стълбовата система на разработване авторският колектив достигна до някои творчески постижения:

- разработен е алгоритъм и е осъществена програмната реализация на метода “пълзяща изчислителна схема”, който се оказва удачен за условията на рудник “Кошава”;
- разработен е алгоритъм и е осъществена програмна реализация на нелинейната задача, като са въведени някои нови елементи в изчислителната схема.

- за оценка на устойчивото състояние на масива около добивните изработки е използван нов подход, основаващ се на критерия Mohr- Coulomb, като с помощта на показателя SF се оценяват количествено отделните разглеждани варианти.

Литература

- Колев, К., С. Боянов и др. *Определяне на физико-механичните параметри на скалите от находище “Кошава”*. Отчет по договор № 1827/2003 г. Архив на НИС при МГУ “Св. Иван Рилски”, 2003.
- Амусин, Б.З., А. Б. Фадеев. *Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики*. Москва, Недра, 1975.
- Гудман, Р. *Механика скальных пород*. Москва, Стройиздат, 1987.
- Парашкевов, Р.Д. и др. *Изучаване състоянието и разработване на методика за контрол на НДС на целиците и камерите в гипсово находище “Кошава”*. Договор 1118. Архив на МГУ, 1989.
- Трашлиев, С. *Доклад за детайлните геоложки проучвания на гипсово находище при с. Сланотрън и с. Кошава, Видинско, извършени през 1959 г.*, Допълнителна записка, Геофонд на КГ, 1960.
- Мюлер, Л. *Инженерная геология. Механика скальных массивов*. Мир, Москва, 1971.
- Зенкевич, О. *Метод конечных элементов в технике*. Мир, Москва, 1975.