

## Моделни изследвания за влиянието на дълбочината на разработване върху състоянието на масива

Росица Ангелова, Драгомир Стефанов

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

**РЕЗЮМЕ.** Извършено е изследване на състоянието на междукामерните целици при камерно-целикова система на разработване с развитие на минните работи в дълбочина. Използвайки моделиране чрез програмния продукт BEAP3D са изследвани три групи модели. Всеки модел възпроизвежда конструктивните елементи на камерно-целиковата система с изолирани правоъгълни целици, с постоянни параметри, при различна дълбочина на разработване за условията на рудник "Кошава". На базата на моделите, изхождайки от спецификата на всеки участък са получени решения удовлетворяващи поставената изследователска цел.

### A STUDY OF INFLUENCE OF MINING DEPTH ON A ROCK MASS CONDITION

**ABSTRACT.** The study of a pillar condition for open-stope-and-pillar mining method is made with a deepening of mining works. Using software BEAP3D, three groups of models are investigated. Each model reproduces constructive elements of the open-stope-and-pillar mining method with isolated rectangular pillars, with constant parameters, for different depths of mining under the conditions in the "Koshava" mine. On the basis of models, be based on specificity for every section, obtain solutions satisfactory for the investigation task.

### Въведение

Дълбочината на разработване е един от доминиращите фактори за оценка на геомеханичните условия при избора на технология за подземния добив на рудните полезни изкопаеми. Важността на този параметър се определя от необходимостта да се отчете големината на скалния натиск, когато се проектира конструкцията на системата на разработване, за да се осигури необходимата устойчивост на нейните конструктивни елементи. Ако за здрави и средно здрави руди този фактор може да няма съществено значение, проблемът става особено актуален при ниски якостни показатели на минералната суровина. Особено когато стойността на вертикалните естествени или индуцирани напрежения е съизмерима или е от един порядък с якостта на натиск на полезното изкопаемо. Тогава увеличаването на дълбочината на разработване, даже с няколко десетки метра, може да промени значително степента на натоварване и да намали локалната и даже и глобалната устойчивост на минния участък.

### Обосновка на проблема

Общоприето е, рудният масив да се определя качествено като слаб или здрав, чрез сравняването на неговата якост на едноосов натиск  $\sigma_c$  с големината на натиска от горележащите скали  $\gamma H$  на определена дълбочина  $H$ , както е показано в табл.1.

Важността на проблема може да се илюстрира със следния пример: при разработване на рудно находище на дълбочина 300 m, при средна обемна маса на горележащите скали  $0,025 \text{ MN/m}^3$ , скалният натиск ще бъде  $\gamma H = 7,5 \text{ MPa}$ . При примерна якост на едноосов натиск  $\sigma_c$  на рудата 125

MPa, отношението  $\sigma_c / \gamma H$  ще бъде равно на 16,7, т.е., над 15 и съгласно табл.1 масивът ще има характеристика "Здрав". Ако обаче якостта на едноосов натиск на рудата е от порядъка на 10 MPa, тогава отношението  $\sigma_c / \gamma H$  ще бъде равно на 1,3, т.е., значително по-малко от 8, и тогава масивът ще бъде определен като "Слаб" (дори като "Твърде слаб").

Таблица 1.

Определяне на качествената характеристика на здравината на масива

| Качествена характеристика на здравината на масива | Отношение между якостта на едноосов натиск и натиска от горележащите скали |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Слаб                                              | Под 8                                                                      |
| Умерено здрав                                     | 8 – 15                                                                     |
| Здрав                                             | Над 15                                                                     |

От това сравнение произлиза необходимостта, при проектиране на добивни работи в масиви с ниски якостни показатели, твърде внимателно да се анализира състоянието на скалния масив при промяна на дълбочината на разработване, което най-точно може да стане с моделни изследвания чрез някой от числените методи на механиката на скалите.

Едно от основните предимства на числените методи е възможността да покажат какво е състоянието на масива, както около единична, така и около множество изработки, т.е. да се определи едромасщабното поведение на минния масив. При използването на числени методи за решаване на минни задачи, обикновено се приема, че минният масив е линейно-еластичен. Решението следва да покаже зони-

те, в които натисковите напрежения превишават якостта на масива, както и зоните с опънни напрежения. Ако се установят такива, проектното решение трябва да се коригира, за да се отстрани недопустимото напрегнато състояние, или да се приеме компромисен вариант (например прилагането на определен вид крепеж, запълнение и др.).

Въпросът се свежда до анализ на разпределението на напреженията в създаващата се подземна минна структура и вземане на съответни решения. Такива задачи са достатъчно сложни и изискват голям обем изчислителна работа, поради което те следва да се решават с използването на числени методи.

## Резултати от моделните изследвания

За целта са направени моделни изследвания върху състоянието на слаб масив, с якост на едноосов натиск 8 МПа ÷ 14 МПа за условията на гипсовото находище Кошава при развитие на минните работи в дълбочина. Моделирано е очакваното състояние на минният масив на дълбочина 230 m, 276 m и 300 m при прилагането на камерно-целикова система на разработване с изолирани правоъгълни целици. Използван е методът на граничните елементи – програмата BEAP3D, която е предназначена за решаване на сложни задачи в областта на минната промишленост. Програмният продукт се състои от два модула: *BEAP* и *Mine Designer* (BEAP3D, Canmet). Чрез аналитичният модул *BEAP* се представя триизмерен анализ на напреженията в масива. Модулът *Mine Designer* е автоматизирана графическа програма от база данни, която обединява числовото моделиране и минното проектиране.

Методиката на изследването включва:

- разработване на *Модел 1*, *Модел 2* и *Модел 3*;
- решение на моделите;
- анализ на получените резултати.

Модел 1 е разработен за дълбочина 230 m, модел 2 за дълбочина 276 m, модел 3 за дълбочина 300 m. Всеки от моделите е разработен за нов проектен участък, изборът на който е максимално съобразен със съществуващите условия в рудника.

Представените модели дават възможност да се получи информация за напреженията, очакваните деформации, коефициентите на устойчивост при определената дълбочина на разработване. Характерът на събраната информация е във вид на графики и затова от особена важност е прецизната съпоставка на получените резултати и тяхната правилна интерпретация.

От особена важност е изследването на характера на разпределение на максималното главно напрежение ( $\sigma_1$ ) с развитие на минните работи в дълбочина.

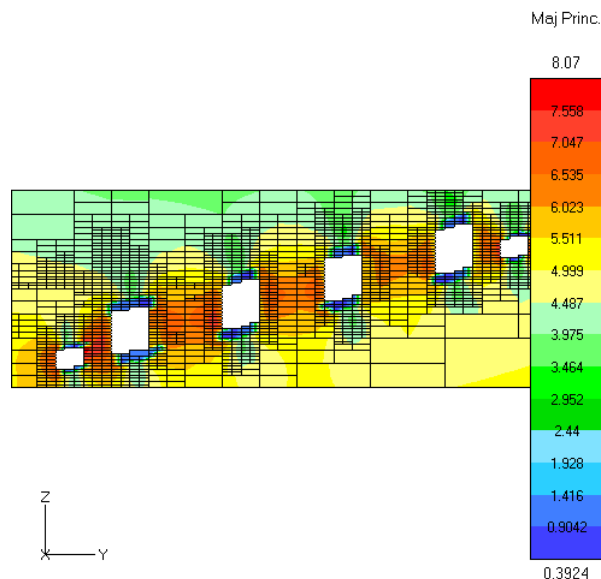
Максималното главно напрежение в гипсовия масив за Модел 1 е натисково за всички целици, като стойности от 4,52 МПа до 5,73 МПа се локализируют в централната част на целиците. С увеличаване на дълбочината, тази зона се стеснява и се наблюдават стойности на максималните главни напрежения, предимно в краищата на целиците от порядъка на 6,95 МПа (фиг.1).

От направеното моделиране се вижда, че максималните главни напрежения за Модел 2 имат стойности от 7,2 МПа (в средата на целика) до 8,10 МПа във външната зона (фиг.2). Сравнението на тези стойности с определените

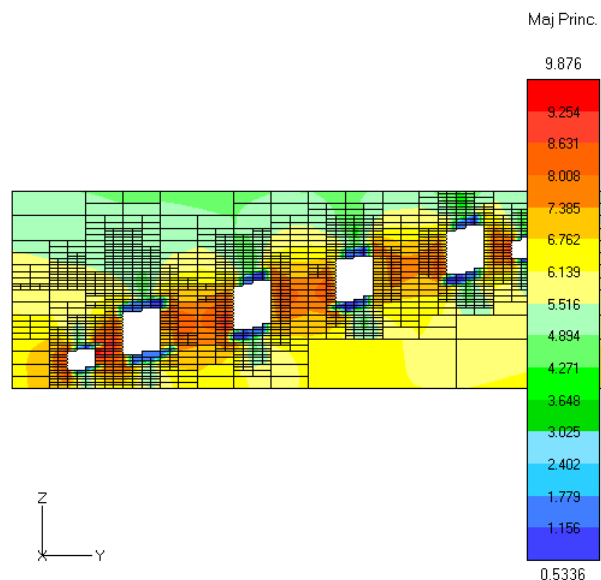
якости на натиск на гипса води до същите заключения, както при модел 1. И тук максималното главно напрежение  $\sigma_1$  е натисково в целия масив около камерите.

Максималните главни напрежения  $\sigma_1$  за Модел 3 имат стойности 7,53 МПа, а с развитие на минните работи в дълбочина достигат 8,47 МПа, (фиг.3).

Установяваме концентрация на максималните и минималните нормални главни напрежения в центъра на целиците и при трите разглеждани дълбочини на разработване.

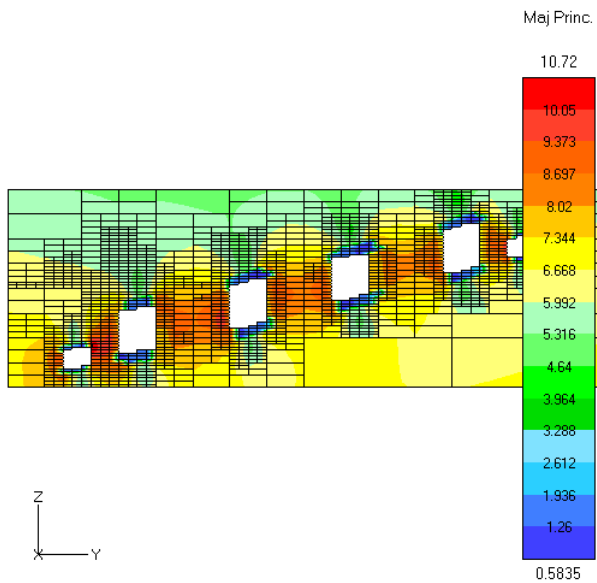


Фиг. 1. Максимално главно напрежение  $\sigma_1$  (Модел 1)

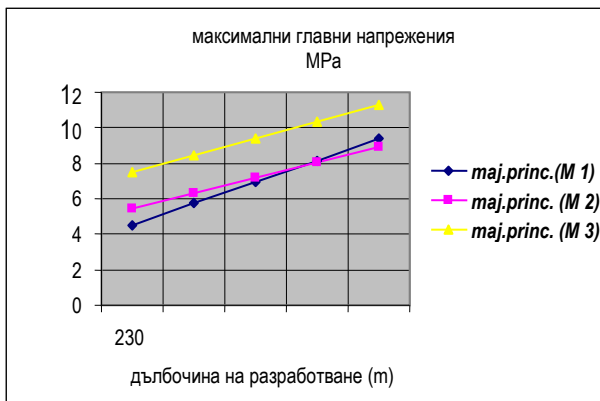


Фиг. 2. Максимално главно напрежение  $\sigma_1$  (Модел 2)

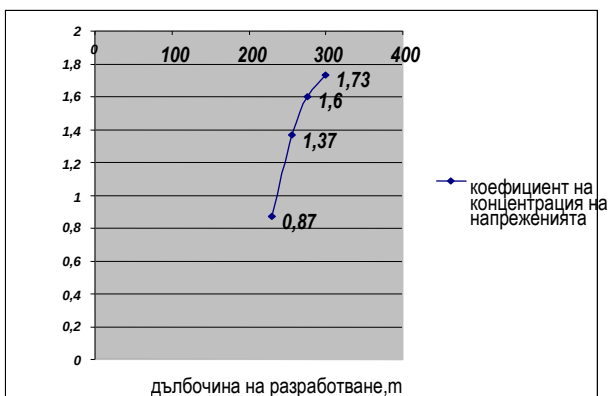
На фиг.4 е показана диаграма на максималните главни напрежения за трите модела при съответните разглеждани дълбочини. Отчита се нарастване на напреженията с увеличаване на дълбочината на разработване. Резултатите от моделирането са очаквани и макар, че разликата в дълбочината не е голяма (70 m) се вижда тяхното стръмно нарастване при увеличаване на дълбочина до 300 m.



Фиг. 3. Максимално главно напрежение  $\sigma_1$  (Модел 3)



Фиг. 4. Диаграма на максималните главни напрежения  $\sigma_1$  за модел 1, модел 2 и модел 3 при нарастване на дълбочината на разработване



Фиг. 4. Зависимост между коефициента на концентрация на напреженията и дълбочината на разработване

От особена важност е въпросът за използване на определен критерий за устойчивост на масива.

Стойностите на критерия на устойчивост *Hoek – Brown* и критерия на устойчивост *Drucker – Prager*, изразени като коефициенти, са част от резултатите, получавани от реше-

нието чрез програмния продукт *BEAP3D*. Трябва да се отбележи, че първоначалните (1980 г., 1983 г.) емпирични зависимости на критерия за устойчивост на *Hoek – Brown* не може да го определят като най-представителен критерий за устойчивост на гипсовия масив. Най-широко критерият се използва в условията на здрави и напукани скали, в които разрушаването настъпва вследствие на превишени натискови или опънни напрежения, на които условия гипсовият пласт не отговаря напълно.

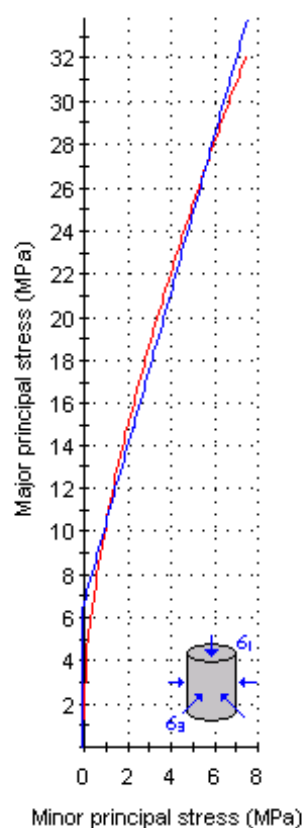
Известно е, че едно от главните препятствия, с които се сблъскваме в областта на числовото моделиране на минния масив е проблемът за достоверността на входните данни за свойствата на масива. Пълноценността на сложното устроените модели и мощни числови програми за анализ е много ограничена, ако нямаме достатъчно достоверни входни данни за свойствата на масива. Стъпка към решаването на проблема е използването на програмния продукт *RocLab*, чиито изчисления се основават на обобщения критерий на устойчивост *Hoek – Brown*, (*Hoek, Carranza, Corcum, 2002*). Част от анализа на гипсовия масив, използвайки програмния продукт *RocLab*, за условията на новия проектен участък е представен на фиг.5.

Потвърждение на горните резултати, получени от моделирането, за рязкото изменение в напрегнатото състояние на рудния масив с напредване на минните работи в дълбочина дават и резултатите, получени от емпиричните изчисления на коефициента на концентрация на напреженията в целиците, (Р.Ангелова, 2004). На приложената диаграма ясно се отчита нарастването на коефициента на концентрация на напреженията с нарастване на дълбочината на разработване (фиг.4).

Критерият на устойчивост *Drucker – Prager* изразен като коефициент на устойчивост  $K_{D-P}$  е даден като резултат при изчисленията чрез *BEAP3D*, съответно за всеки от моделите. Физическият му смисъл е аналогичен на този на критерия на *Hoek – Brown*, т.е., когато  $K_{D-P} < 1$ , настъпва разрушаване, а стойности близки до единица, съответват на ниска степен на устойчивост. При  $K_{D-P} > 1$  състоянието на масива е устойчиво. При получените резултати от моделирането за дълбочина от 230 m той достига стойности 3,1 MPa ÷ 3,8 MPa. С приближаване към камерите наблюдаване намаляване до 1,7 MPa, (фиг.6). Логично е да се очаква такова намаляване на стойностите на коефициента, което е вследствие на увеличаването на хоризонталните напрежения (опънни напрежения), провокирани от последващо раздуване на целика. При дълбочина от 276 m – 1,7 MPa ÷ 2,38 MPa, (фиг.7) и при дълбочина от 300 m – 2,36 MPa ÷ 1,69 MPa, (фиг.8). Като цяло, отчитайки резултатите от разпределението на  $K_{D-P}$ , може да се направи извод, че е постигната устойчивост на системата камери-целици, при така заложените параметри на системата.

Както е видно от сравнителната табл.2 нарастването на максималните главни напрежения  $\sigma_1$  е съпроводено и с нарастване на коефициента на концентрация на напреженията, докато стойностите на коефициента на устойчивост *Drucker – Prager*, (фиг.9) намаляват.

### Analysis of Rock Strength using RocLab



#### Hoek-Brown Classification

intact uniaxial compressive strength = 30 MPa  
 GSI = 58  $m_i = 12$  Disturbance factor = 0

#### Hoek-Brown Criterion

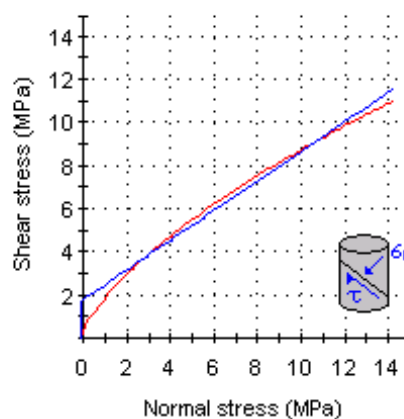
$m_b = 2.678$   $s = 0.0094$   $a = 0.503$

#### Mohr-Coulomb Fit

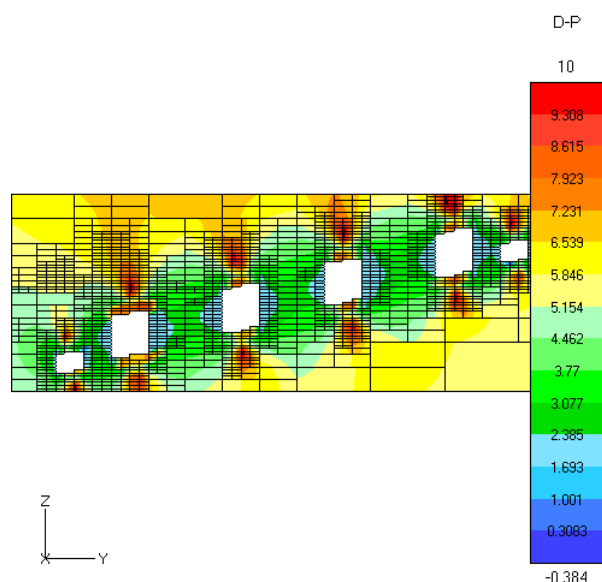
cohesion = 1.789 MPa friction angle = 34.45 deg

#### Rock Mass Parameters

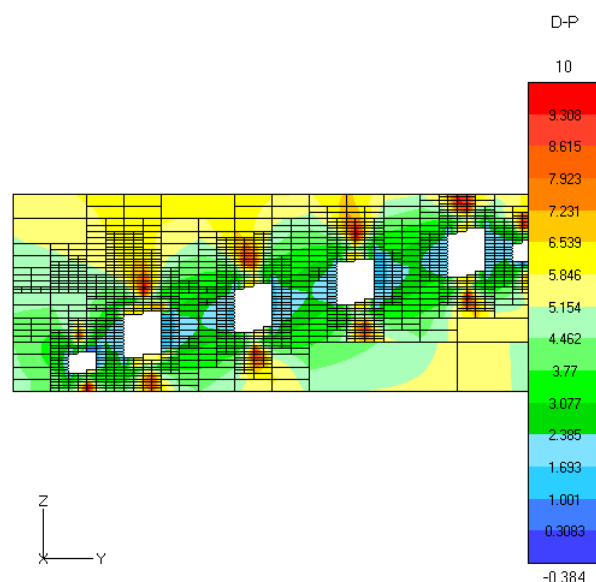
tensile strength = -0.105 MPa  
 uniaxial compressive strength = 2.865 MPa  
 global strength = 6.791 MPa  
 modulus of deformation = 8680.82 MPa



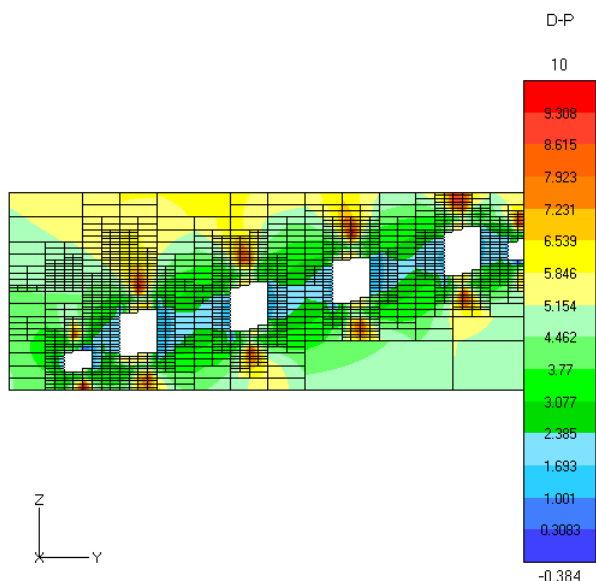
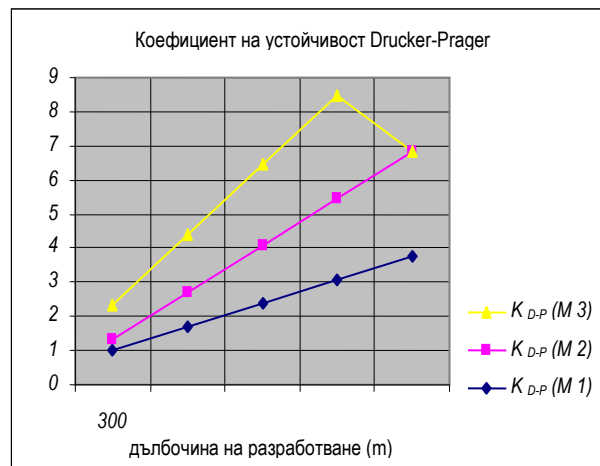
Фиг. 5. Напряжения в гипсовия масив анализирани с RocLab



Фиг. 6. Коэффициент на устойчивост *Drucker-Prager* (Модел 1)



Фиг. 7. Коэффициент на устойчивост *Drucker-Prager* (Модел 2)

Фиг. 8. Коефициент на устойчивост *Drucker –Prager* (Модел 3)

Фиг. 9. Стойности на коефициента на устойчивост D-P

Таблица 2.  
Сравнителна таблица на напреженията  $\sigma_1$ ,  $K_k$  и  $K_{D-P}$ 

| Дълбочина на разработване, m | Напрежения $\sigma_1$ , MPa | Коефициент на концентрация на напреженията $K_k$ | Коефициент на устойчивост <i>Drucker – Prager</i> |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 230                          | 4,52                        | 0,87                                             | 3,8                                               |
| 276                          | 7,2                         | 1,37                                             | 2,38                                              |
| 292                          | 8,54                        | 1,6                                              | 2,39                                              |
| 300                          | 8,47                        | 1,73                                             | 2,36                                              |

## Заклучение

Все по-пълното опознаване закономерностите на проявлението на скалния натиск при нарастване на дълбочината на разработване, довежда до по-точно и реално изчисляване на минно-технологичните параметри за дадените условия на разработване. От особена важност е провеждането на изследвания, които се основават на научни експерименти в промишлени условия и преди всичко върху численото моделиране и всеотрасно изучаване на физико-механичните и геоложките свойства на скалите.

Извършеният анализ и направените заключения се основават на надеждността, пълнотата и достоверността на резултати от извършени геомеханични изследвания през предишни етапи в района на находище "Кошава" и най-вече публикуваните в (Иванов, Стефанов, Василев, 1993). От получените на тази основа данни са изградени и съответно разглеждат в статията модели. Следва да се подчертае, че в различните литературни източници има различна по обем и с различна степен на достоверност информация за гипсовия масив като цяло. Това е още един аргумент за необходимостта от създаване на единна комплексна методика за изследване и разработване на гипсовия пласт на сегашния етап, когато все още се прецизират данните за новия проектен участък.

Процесите на разрушение, които се наблюдават в различни участъци на рудника показват, че един от основните проблеми, който трябва да намери решение е оценка на устойчивостта на гипсовия масив. Извършеното изследване за състоянието на междукамерните целици при камерно-целикова система на разработване с развитие на минните работи в дълбочина, е част от от решаването на този важен за гипсовия рудник проблем. Авторите на изследването смятат, че е целесъобразно този проблем да бъде разрешен чрез единна методика, като се търси най-подходящ модел за всеки конкретен участък. Именно на базата на конкретно разработените модели, изхождайки от специфичните особености на всеки участък са получени решения удовлетворяващи поставената изследователска цел.

## Литература

- Ангелова Р., *Изследване параметрите на камерно-целикова система на разработване*. II Младежка техническа конференция, София, 2004.
- Иванов В., Др.Стефанов, В. Василев. "Геомеханична оценка на рудник "Кошава", 1993.
- Baolin Wang, *BEAP3D*, Canmet, Canada.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corcum, B. *North American Rock Mechanics Society meeting*. Toronto, 2002.