

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАПРЕГНАТОТО И ДЕФОРМИРАНО СЪСТОЯНИЕ НА МАСИВА ПРИ РАЗРАБОТВАНЕ НА МОЩНИ РУДНИ ТЕЛА

*Георги Михайлов, Георги Трапов*

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

**РЕЗЮМЕ.** При разработване на мощни рудни тела широко приложение намират комбинираните системи на разработване. По същество това са многостадийни добивни технологии, чиято ефективност зависи от начина на управление на скалния натиск и последователността на развитие на минните работи. В конкретния случай е изграден универсален числен модел на рудно тяло, осигуряващ възможност за изследване на напрегнатото и деформирано състояние (НДС) на масива по Метода на крайните елементи (МКЕ). Моделът позволява да се разглеждат технологии със запълване на добивното пространство и блоково самообрушаване, които намират широко приложение в световната практика при разработване на мощни рудни тела.

Изчислителната процедура е апробирана за условията на реален обект – рудно тяло с щокообразна форма, за което са приложими както технологии със запълване, така и с обрушаване. Основните изводи са подкрепени с богат графичен материал, доказващ влиянието на изкуствения масив (запълнението) върху състоянието на конструктивните елементи на системата на разработване през различните етапи на развитие на минните работи.

### STUDY OF THE STRAIN - STRESS STATE OF THE ROCK MASS DURING MINING OF THICK ORE BODIES

*Georgi Mihaylov, Georgi Trapov*

*University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"*

**ABSTRACT:** Combined mining systems have been widely applied to mining of thick ore bodies. These are essentially multiphase mining methods whose effectiveness depends on the mode of rock pressure control and the sequence of operations. In this specific case, a universal numerical model for an ore body has been developed that allows the study of the state of strain and stress of the rock mass using the Finite Element Model (FEM). The model allows backfill and block caving methods to be considered - a method which is widely employed in mining of thick ore bodies worldwide.

The calculation procedure has been approbated for a real object representing a stock-shaped ore body to which both backfill and block caving methods may be applied. The main conclusions are supported by graphical material, which demonstrates the influence of the artificial rock mass (backfill) on the condition of the construction units of the mining system in the different stages of mining operations.

### Въведение

При разработване на мощни рудни тела се прилагат технологии, които най-често са комбинация между две, а в някои случаи и три системи на разработване. Редът на развитие на минните работи в границата на блока до голяма степен се определя от формата на рудните тела. Те могат да бъдат мощни жили, пластове, щокове, гнезда, лещи и пр. И докато при жилите и пластовете въпросът до голяма степен е решен заради правилните размери на находището, то при неправилните форми и особено при щоковете са приложими множество варианти, което прави изборът на оптимална технология особено актуален. Един от основните фактори, влияещи върху този избор, е напрегнатото и деформирано състояние (НДС) на масива около добивните изработки.

### Универсален модел за изследване на НДС на масива при разработване на мощни рудни тела

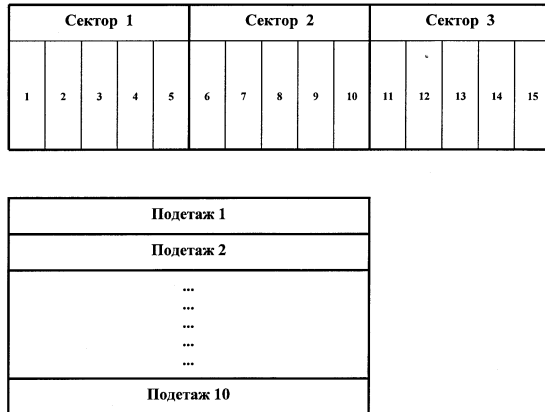
За изследване на НДС на масива около добивните изработки е използван Методът на крайните елементи (МКЕ). Теоретичната постановка, алгоритъмът за реализация на решението, както и параметрите на собствения програмен продукт FEMEL са изложени в (Трапов, Михайлов, 2004 и

Михайлов, Трапов и др. 2004). В основата на модела е залегнал принципът за универсално използване на изчислителната схема за няколко типа задачи, а именно:

- Изследване на НДС на масива при определяне на размерите на камерите и поддържащите целици;
- определяне на реда за изземване на камерите в границите на един подетаж;
- определяне на последователността за разработване на отделните подетажи в границите на етаж (възходящ или низходящ ред на разработване);
- определяне на размерите на подсичащото пространство при използване на блоково самообрушаване;
- анализ и оценка на състоянието на подготвителните изработки.

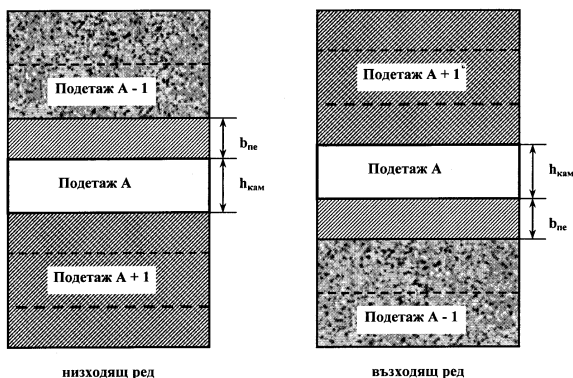
Мрежата от възлите за решаване на задачата по МКЕ е построена на принципа еднакъв брой възли във всеки ред. По този начин се постига ефектът на автоматично генериране на мрежата. Използването на друг подход за автоматично генериране се оказва не особено рационален, тъй като мощните рудни тела по принцип се характеризират със сложна морфологична даденост и трудно може автоматично генерираните точки да попаднат

в характерните зони, например контактите между различни литоложки разновидности, тектонски нарушения и пр. Началните и граничните условия се задават в зависимост от получените стойности от индуцираните напрежения от геоложкия товар. Те съответстват на напрегнатото състояние на ненарушения масив и зависят от релефа на повърхността, нееднородността на средата (литоложките разновидности, изграждащи изчислителната схема), наличието на тектонски нарушения. Универсалният модел предвижда едновременна работа в до три сектора на даден подетаж, при възможност да се отчита състоянието на масива общо в 10 подетажа- фиг.1. Изчислителната схема съдържа 69 възела в ред и 49 реда, което означава, че общият брой на възлите е  $N_{взз}=3381$ , а броят на



Фиг.1 Модел на изчислителна схема за развитие на минните работи в сектори и подетажи

четириъгълните елементи е  $N_{вл}=3264$ . В тези контури могат да се впишат до 15 добивни единици в един подетаж. Тогава при общ брой на подетажите 10, максималният брой на производствените единици в целия блок ще бъде  $N_{вл}=150$ . Този брой е многократно по-голям от възможното число производствени единици в рамките на добивен блок с височина на етаж  $H_{етм}=100\pm 200\text{ m}$ , каквато е нормалната практика по света. Така изградената изчислителна мрежа позволява да се изменят в широки граници геометричните параметри на системата на разработване. Например, при камерно-целикова система: ширината на първичните камери  $b_1$ , ширината на вторичните камери  $b_2$ , височината на камерите  $h_{кам}$ , височината на подетажа  $h_{не}$ , дебелината на целика между отделните подетажи  $b_{не}$ – фиг.2. В подкрепа на



Фиг.2 Възходящ и низходящ ред на изземване на запасите в границите на един етаж

универсалния характер на изградения модел може да се посочи възможността за използване на изкуствен масив (запълнение) с различни механични свойства. Те се явяват решаващ фактор при определяне на последователността за развитие на минните работи както в рамките на един подетаж, така и в границите на целия етаж (блок). Следователно, геометричните параметри на системата на разработване и механичните свойства на запълнението са основните аргументи във функционалните зависимости за изследване на НДС на масива около добивните изработки.

### Формиране на множество варианти за разработване на мощни рудни тела със запълване на добивното пространство

При разработване на щокове са възможни и трите добивни технологии: с открито добивно пространство, със запълване, със обрушаване на рудата и страничните скали. В процедурата за избор на оптимално решение те нямат равнопоставено положение, защото технико-икономическите показатели, по които се оценяват, съществено се различават. Най-често прилагани технологии при разработване на ценни руди са със запълване или обрушване на рудата и страничните скали. В двата случая по съвършено различен начин се достига до ликвидиране на празното добивно пространство, а от там и до равнището на показателите за сравнение. Формирането на множество допустими варианти се основава на две важни предварителни условия:

- геоложкия блок (рудното тяло) представлява един добивен блок;
- производствената мощност на рудника се осигурява от няколко такива блока, като добивните работи в тях взаимно не си влияят.

Множеството варианти може да се формира на базата на системния подход чрез единство от логически свързани елементи, при което изменението на един от тях води до изменението на всички останали. Решаването на такава системна задача изисква използване на единен принцип в изчислителния процес за всички възможни варианти. Налага се формиране на три групи входни величини: физически, информационни и аналитико-изчислителни. Предлаганата схема включва шест взаимно-свързани елементи, наречени още нива на алтернативен структурен граф. Това са :

- Ниво "А"** Начин на разкриване на рудничното поле;
- Ниво "В"** Начин на развитие на минните работи в границите на рудничното поле;
- Ниво "С"** Начин на отбиване на рудата;
- Ниво "Д"** Система на разработване;
- Ниво "Е"** Начин на поддържане на добивното пространство;
- Ниво "Д"** Начин на управление на скалния натиск.

Отчитайки съществуването на т.н. несъвместими връзки между алтернативите на отделните нива се установява, че броят на приложимите варианти  $N_{прил}$  надхвърля 190 при теоретичен брой на вариантите  $N_{теор} = 360$ . В множеството на приложимите варианти попада камерно-целиковата система на разработване с едновременно изземване на

1/5 част от запасите в блока, показана на фиг.3 (Именитов,1984).

Тя се характеризира с предварително разделяне на камерите на първични и вторични. Първичните камери контактуват от двете страни с реален масив, докато едната или двете страни на вторичните камери са изкуствен масив-в случая втвърдяващо или хидравлично запълнение. Успешното прилагане на тази технология е възможно при спазване на следното ограничаващо условие: изкуственият целик не трябва никога да контактува от двете страни с открити пространства. От тук идва и същността на добивната технология – едновременно изземване на 1/5 част от запасите в блока. Височината и дължината на създаваните открити пространства, както и конструкцията на дъното на блока се определят в предварителните етапи на проектирането на базата на комплексни критерии. Ширината на камерите (първични и вторични), както и редът за развитие на минните работи в границите на етаж (низходящ – възходящ) имат най-силно влияние върху показателите, осигуряващи ефективното разработване на дадено находище. Затова обект на особено внимание е изследването на НДС на масива при начални условия, дефиниращи размерите на конструктивните елементи на системата и механичните свойства на запълнението.

### Изследване на НДС на масива при камерно-целикова система на разработване

Камерно-целиковата система [КЦС] на разработване с едновременно изземване на 1/5 част на запасите в подетажа се характеризира с голяма нееднородност на масива. Тя трябва задължително да се отчете при численото моделиране, респ. при изграждане на изчислителната схема. Едно от големите предимства на МКЕ е способността му без особени затруднения да се справи с този феномен. Комбинацията естествен масив-изкуствена среда-открити добивни пространства представлява многофазна система, в която се развиват процесите по преразпределение на напреженията около минните изработки. Алгоритъмът, по който се реализира изчислителният процес, включва оценка на напрегнатото състояние на ненарушения масив, вкл. и аномалиите в него; въвеждане на граничните условия в изчислителната схема; задаване на началните условия, свързани с геометрията на добивните изработки и деформационните характеристики на средата. Като метод на изследване е възприет сравнителният анализ. Програмният пакет FEMEL дава възможност да се изведе пълният набор на информацията за НДС на масива, като на преден план е изнесено изучаването на основните закономерности в разпределението на следните параметри:

- хоризонтални напрежения  $\sigma_x$ ;
- вертикални напрежения  $\sigma_y$ ;
- тангенциални напрежения  $\tau_{xy}$ ;
- ъгъл на завъртане  $\alpha$  на максималното главно напрежение  $\sigma_1$  спрямо хоризонталната равнина;

- коефициент на устойчивост,  $FS_{MC}$  (Factor of Safety), определен съгласно критерия на Mohr-Coulomb.

Възприема се еднаква ширина на първичните и вторичните камери, т.е.

$b_1 = b_2 = 8 \text{ m}$ . По-малката ширина на камерите влиза в противоречие с технологичните възможности за ефективно използване на сондажното отбиване. Освен това, при  $b_1 = b_2 < 8 \text{ m}$  разстоянието между изработките за доставка на рудата става много малко и те започват взаимно да си влияят. Въпросът за намиране на оптималната ширина на камерите  $b_1^{opt}$ ,  $b_2^{opt}$  не се разглежда в това изследване, тъй като се налага въвеждане на допълнителни условия, свързани с поведението на масива около стените на камерите.

Същността на КЦС с едновременно изземване на 1/5 част от запасите в подетажа налага следната последователност на изземване: камера №1, камера №3, камера №5, камера №2, камера №4. При това положение първични са камерите №№1 и 3, а вторични - камерите № №5, 2, 4. Ако в границите на даден подетаж се разработват две или три секции (каквато е философията на универсалния модел) последователността на изземване ще бъде:

I етап	камери №№	1,6, 11.
II етап	камери №№	3,8, 13.
III етап	камери №№	5,10,15.
IV етап	камери №№	2,7, 12.
V етап	камери №№	4,9, 14.

Този ред на разработване съществено се различава от традиционното използвания "камера-целик-камера". Неговото най-голямо предимство е паралелното протичане на два процеса: набиране на якост на изкуствения масив и изземване на камера, като двата обекта са на достатъчно голямо разстояние. Това налага задължително да се оценят деформационните характеристики на изкуствения масив (запълнението) най-малко в три стадия.

**I стадий** – в момент, когато запълването на дадена камера е завършено;

**II стадий** – втвърдяващото запълнение е набрало нормативна якост за време  $t_1$  от момента на запълване;

**III стадий** – запълнението продължава да набира якост за време  $t_2$  от момента на запълване ( $t_1 < t_2$ ).

Времето  $t_2$  отчита момента, когато целият подетаж е запълнен. Тогава се оценява състоянието както на изкуствения, така и на ненарушения с минни изработки масив, в който предстои да се развият добивните работи (при низходящ или възходящ ред на изземване). От гледна точка на икономическата ефективност този момент има особено важно значение, тъй като състоянието на масива ще зависи от физико-механичните свойства на запълнението. А те от своя страна са функция от разходите за приготвянето му. В табл.1 са показани деформационните характеристики на различните среди, използвани в изчислителната схема. В табл.2 е показана динамиката в изменението на деформационните показатели на запълне-

нието в зависимост от трите стадия на консолидация и последователността на изземване на камерите в блока. Обект на сравнителния анализ е изследване на НДС на масива при определен брой типови задачи. В конкретния случай тези задачи са четири на брой. В табл.3 са посочени формулировката на задачата и вида на търсеното решение. Общо три алтернативи могат да се разглеждат с така подготвения модел:

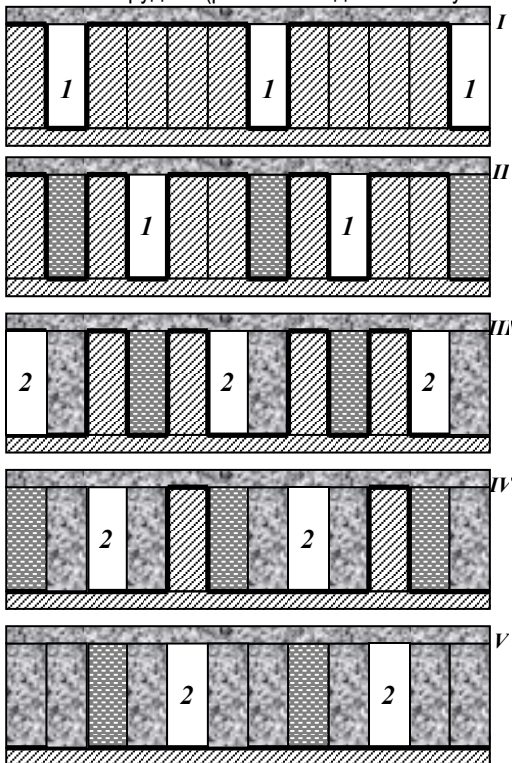
- **Алтернатива №1** - изземване на запасите в границите на един подетаж;
- **Алтернативи №2 и №3** - изземване на запасите в отделните подетажи на блока, съответно във възходящ и низходящ ред.

Таблица 1.

Свойства на средите, включени в изчислителната схема

Вид на средата	Модул на еластичност, E, МПа	Коефициент на Поасон, $\mu$	Обемна плътност, $\gamma$ , kg/m <sup>3</sup>
Руда	70 000	0.28	2800
Запълнение I стадий	100	0.15	2100
Запълнение II стадий	350	0.18	2100
Запълнение III стадий	500	0.22	2100

Натрупаният графичен материал от изследване на НДС се представя във вид на машинни графики. Удобно е тези графики да се систематизират в самостоятелен албум-приложение, за да може по-добре да се анализират получените решения за различните алтернативи, отделните типови задачи и следващите ги етапи и стадии на изземване на рудата (респ. въвеждане на изкуствения



Фиг. 3. Камерно-целикова система на разработване – вариант едновременно изземване на 1/5 част от запасите на блока; I, II, ..., V – последователност на изземване на камерите; 1 – първични камери; 2 – вторични камери

масив). Поради ограничения обем тук ще бъдат приложени някои от най-характерните машинни графики, даващи възможност да се направят обобщаващи изводи. Стойностите на изолините в машинните графики имат следния смисъл: напреженията  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , са изразени в МПа; ъгълът на завъртане на максималното главно напрежение  $\sigma_1$  спрямо хоризонталната равнина е в градуси; ако  $FS_{M-C} > 1$ , разглежданата среда е в устойчиво състояние;  $FS_{M-C} < 1$  съответства на разрушаване. Следователно, степента на устойчивост нараства с увеличаване на  $FS_{M-C}$ .

На фиг.4 е показано разпределението на хоризонталните  $\sigma_x$  и вертикалните  $\sigma_y$  напрежения в ненарушения масив, което се отличава с твърде неравномерния си характер. Освен това градиентът на нарастване на вертикалните напрежения е твърде висок и не е ориентиран във вертикално направление. Има основание

Таблица 2

Динамика в изменение на свойствата на запълнението в зависимост от избраната последователност на развитие на минните работи в подетажа

Показател	Етап на изземване	Изземване на камери №№				
		1/6/11	3/8/13	5/10/15	2/7/12	4/9/14
Модул на еластичност E, МПа	I	0	70 000	70 000	70 000	70 000
	II	100	0	70 000	70 000	70 000
	III	350	100	0	70 000	70 000
	IV	500	350	100	0	70 000
	V	500	500	350	100	0
	VI	500	500	500	350	100
	VII	500	500	500	500	350
	VII <sup>a</sup>	500	500	500	500	500
Коефициент на Поасон, $\mu$	I	0	0.28	0.28	0.28	0.28
	II	0.15	0	0.28	0.28	0.28
	III	0.18	0.15	0	0.28	0.28
	IV	0.22	0.18	0.15	0	0.28
	V	0.22	0.22	0.18	0.15	0
	VI	0.22	0.22	0.22	0.18	0.15
	VII	0.22	0.22	0.22	0.22	0.18
	VII <sup>a</sup>	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Обемна плътност $\gamma$ , kg/m <sup>3</sup>	I	0	2800	2800	2800	2800
	II	2100	0	2800	2800	2800
	III	2100	2100	0	2800	2800

	IV	2100	2100	2100	0
	V	2100	2100	2100	2100
	VI	2100	2100	2100	2100
	VII	2100	2100	2100	2100
	VII <sup>a</sup>	2100	2100	2100	2100

да се направи изводът, че при разглеждане на задачи от такъв комплексен характер задължително трябва да се оцени напрегнатото състояние на ненарушения масив, както и ориентацията на главните напрежения. Последователното развитие на етапите от I до V показва съществено преразпределение на действащите напрежения около добивните изработки. Интересен феномен се забелязва през втория етап, когато се изземва камера №3, а камера, №1 вече е запълнена-фиг.5. Състоянието на изкуствения масив съответства на стадий №1, т.е.запълнението не е постигнало нормативна якост. Прави впечатление, че вертикалните напрежения спадат с твърде голям градиент. В този момент изкуственият масив не може ефективно да противодейства на страничния отпор, предизвикан от преразпределението на напреженията след изземване на камера №3. Налице е един от съществените недостатъци а именно втвърдяващото запълнение не може веднага да се превърне в активен поддържащ елемент. Вертикалните напрежения  $\sigma_v$  в зоната на току що запълнената камера са твърде ниски. Вероятно те съответстват на напреженията предизвикани от собственото тегло на запълнението. В процеса на по-нататъшната изследователска работа този факт има съществено значение. Той показва, че втвърдяващото запълнение трябва да осигури собствената си устойчивост, когато една от стените на изкуствения масив се "отвори" (при изземване на вторичните камери). В по-късните етапи на разработване се забелязва, че вертикалните напрежения  $\sigma_v$  в изкуствения масив достигат прекалено голяма стойност  $45 \text{ MPa}$  (например етап №4, камера №2). Това е невъзможно. Изкуствен масив с такава якост означава нереална себестойност на 1 тон добита руда. Обяснението следва да се търси във факта, че изкуственият масив не се е превърнал в активна носеща среда, въпреки че вече е изминал периодът  $t_1$ . На фиг.6 е показано разпределението на вертикалните напрежения  $\sigma_v$  след завършване на 7 етап на разработване, т.е. когато добивните работи са изцяло приключили в даден подетаж. Значителна концентрация на напрежения се наблюдава в краищата на изчислителната схема. На този факт следва да се гледа с резерви, тъй като "краевите" ефекти безусловно оказват влияние. Очевидно при такава голяма ширина на подсечената площ, съответстваща на  $15b_1$ , задължително между отделните сектори трябва да се оставят бариерни целици. Те ще предизвикат разтоварващ ефект, чиято големина ще бъде пропорционална на отношението  $H/15b_1$ . В конкретния случай е налице значителна зона, разтоварена от вертикалните напрежения  $\sigma_v$ . Тя обхваща практически цялото моделирано пространство – 3 сектора. Това се обяснява с факта, че запълнението, макар и набрало необходимата якост, не се е превърнало в активна носеща среда. Моделирането показва качествена страна на процеса, но разтоварената зона се явява количествен фактор - по нейните размери може да се съди за ефекта от запълване на добивните

пространства. Горните разсъждения дават основание да се заключи, че до този момент ефектът от запълнението е нулев. От тази гледна точка особено актуален е въпросът за изменение на НДС на масива при възходящ и низходящ ред на отработване на отделните подетажи (вж.фиг. 2). И в двата случая добивните работи в два съседни подетажа се разделят с целик. Неговата дебелина е  $20 \text{ m}$  и е съобразена с възможността за евентуалното му последващо изземване. Тази постановка на задачата напълно съвпада с концепцията за изграждане на универсалния модел. Сравнителният анализ показва, че при възходящия и низходящия ред на изземване са налице две съществени обстоятелства. **Първо.** И в двата случая добивните работи попадат в зона на влияние на минните работи, т.е. в подработен масив (при възходящия ред на развитие) и в надработен масив (при низходящия ред на развитие). **Второ.** Принципно различно е състоянието на подработения, респ. надработения масив. То най-добре се оценява с коефициента на устойчивост  $FS_{M-C}$ , показан на фиг.7 и фиг.8. При низходящия ред на развитие  $FS_{M-C} > 1$ , докато при възходящия ред преобладават значителни зони, за които  $FS_{M-C} < 1$ . Ниските стойности на  $FS_{M-C}$  се обясняват с високата концентрация на хоризонталните напрежения, достигащи до  $\sigma_x = 20 \text{ MPa}$ . Разрушаването на масива над камерите означава, че използването на sill pillar или crown pillar е невъзможно. Двата вида целици обаче намират приложение главно при възходящия ред на изземване. Значително по-добро е състоянието на целика между двата подетажа при низходящия ред. Този факт има важно практическо значение, особено като се вземе под внимание обстоятелството, че целикът в определен момент трябва да се изземва, т.е.много малка е вероятността той да се класифицира като загуби.

Методичният подход за изследване на НДС на масива при камерно-целикова система на разработване включва сравнителен анализ с варианта камера-целик-камера. Този вариант се приема като базов, изхождайки от обстоятелството, че намира широко приложение в световната практика. На фиг.9 е показана постановката на задачата.

Таблица 3  
Типови задачи за изследване на НДС на масива

Задача №	Характер на търсеното решение
<b>Задача №1</b> Изследване на НДС на ненарушения масив.	Характер на разпределение на напреженията; оценка на аномалиите за сметка на нееднородността на средата и началните гранични условия, въведени в изчислителната схема.
<b>Задача №2</b> Изследване на НДС през петте етапа на изземване на добивните камери.	Характер на изменението в напрегнатото състояние на масива и запълнението. Оценка на формираните се зони на разрушаване и концентрация на напреженията. Оценка на носещата способност на изкуствения масив и състоянието на изработките за източване и доставка на рудата.

<b>Задача №3</b> Изследване на НДС след изземване на запасите в даден подетаж.	Оценка на напрегнатото състояние след приключване на добивните работи на даден подетаж във връзка с началото на изземване на запасите на следващия.
<b>Задача №4</b> Изследване на НДС на масива при използване на технология камера-целик-камера.	Оценка на напрегнатото състояние на конструктивните елементи на системата: камери, целици, изработки за източване и доставка на рудата. Оценка на съвместната работа на целиците и втвърдяващото запълнение. Характер на напрегнатото състояние на масива около първичните и вторичните камери.

първичните камери;  $n_2$ -брой на вторичните камери;  $L$ -дължина на разработвания участък;  $\Delta_1$ -относителен дял на запасите в първичните камери;  $\Delta_2$ -относителен дял на запасите в вторичните камери при условие, че  $b_1=b_2$ . Очевидно  $n_2=N-n_1$ . Освен това  $n_1=(N+1)/2$ . Тогава

$$L = \frac{N+1}{2}b_1 + \frac{N-1}{2}b_2$$

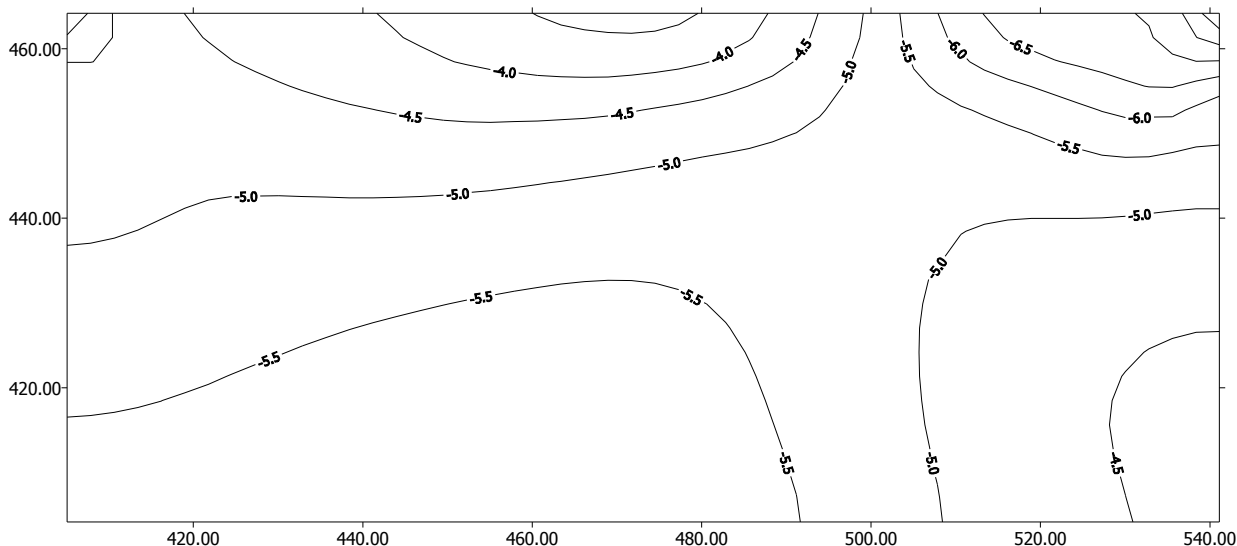
$$\Delta_{11} = \frac{n_1}{N} = \frac{N+1}{2N}$$

$$\Delta_1 = \frac{n_1 b_1}{n_1 b_1 + (n_1 - 1)b_2}$$

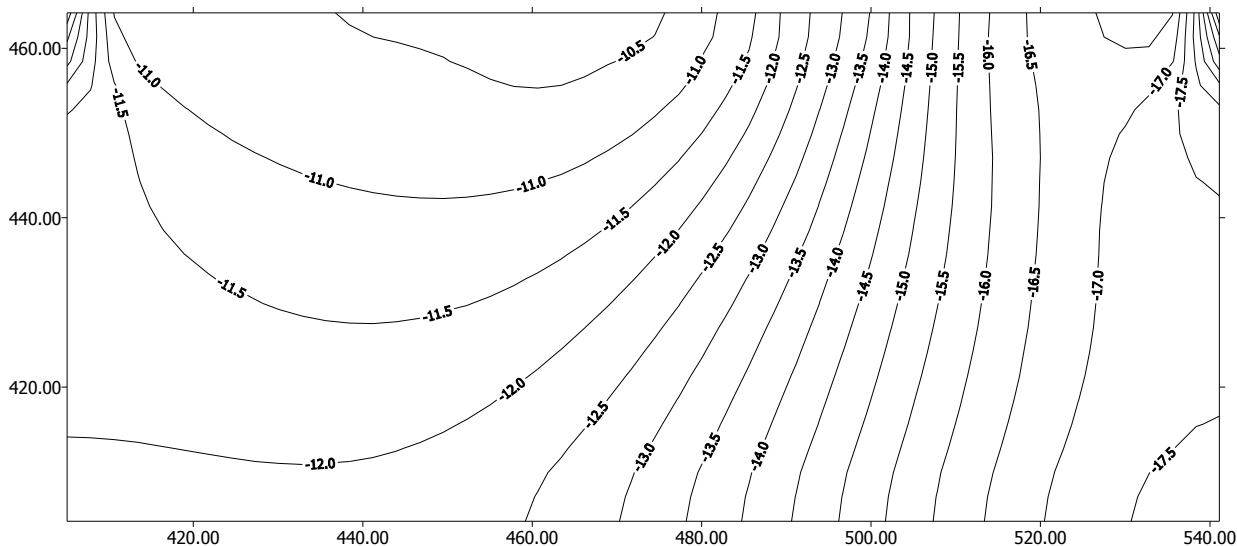
Граничната стойност  $\langle \Delta_1 \rangle$  на относителния дял на първичните камери  $\Delta_1$  може да се изрази чрез

$$\langle \Delta_1 \rangle = \lim_{n_1 \rightarrow \infty} \Delta_1 = \frac{b_1}{b_1 + b_2}. \text{ Ако } b_1=b_2, \text{ то } \langle \Delta_1 \rangle = 0.5.$$

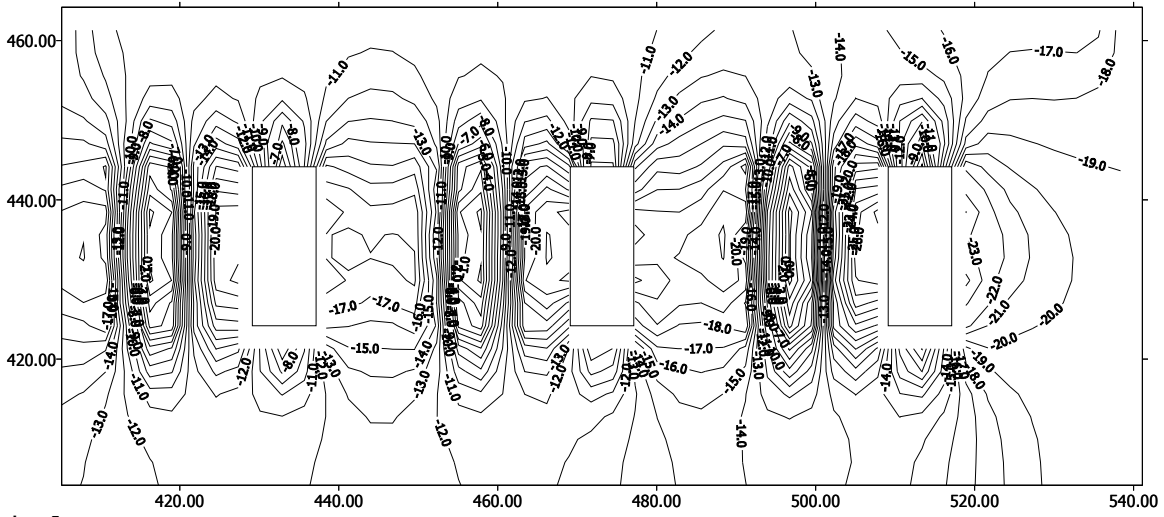
Основни входни параметри са:  $b_1$ -ширина на първичните камери;  $b_2$ -ширина на вторичните камери;  $N$ -общ брой на камерите в участъка. Броят на камерите в участъка следва да бъде нечетно число. В противен случай технологията камера-целик-камера губи своя смисъл. Изходните параметри в резултат на решаване на задачата са:  $n_1$ -брой на



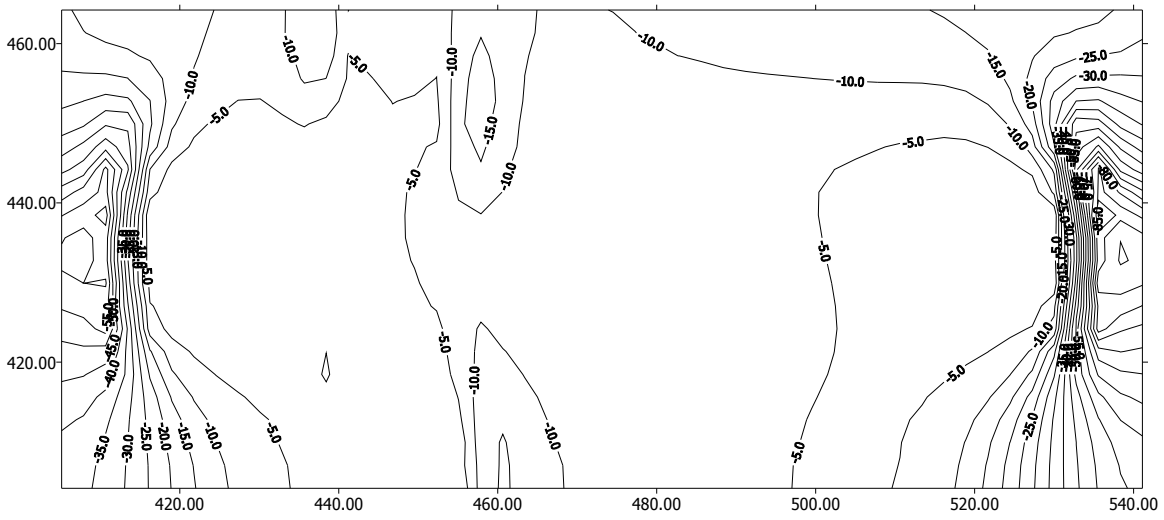
Фиг. 4<sup>а</sup>



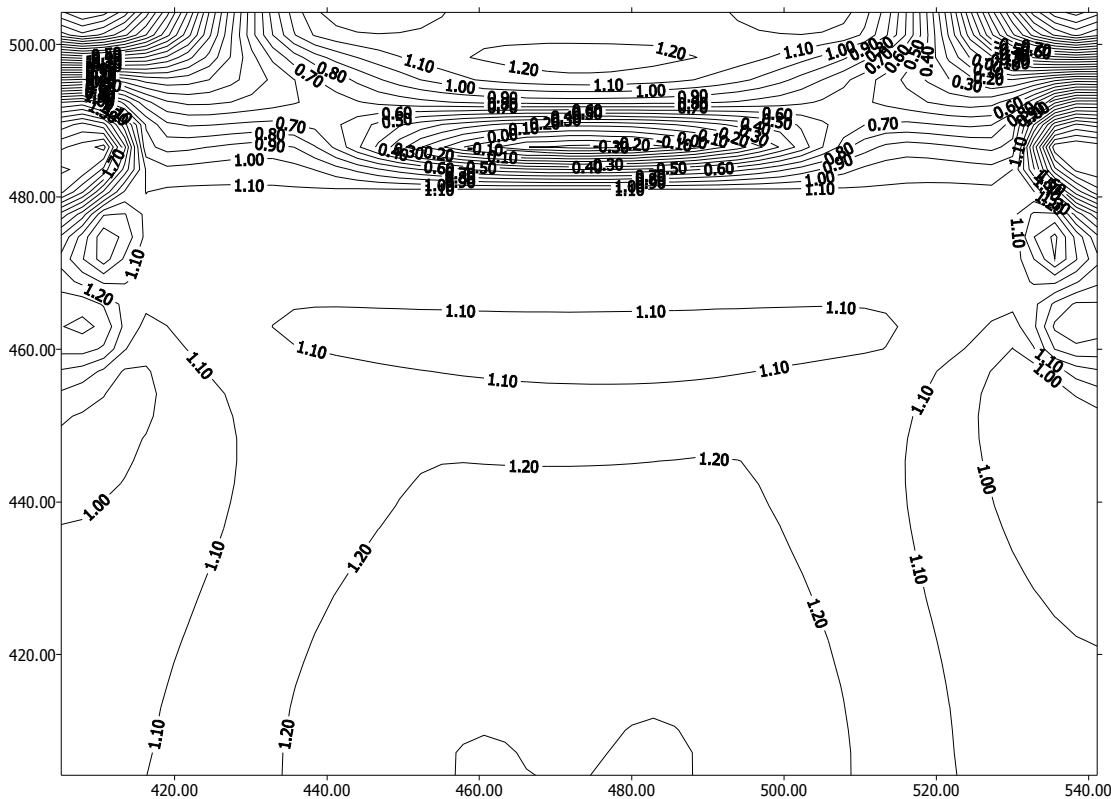
Фиг. 4<sup>с</sup>



Фиг. 5



Фиг. 6

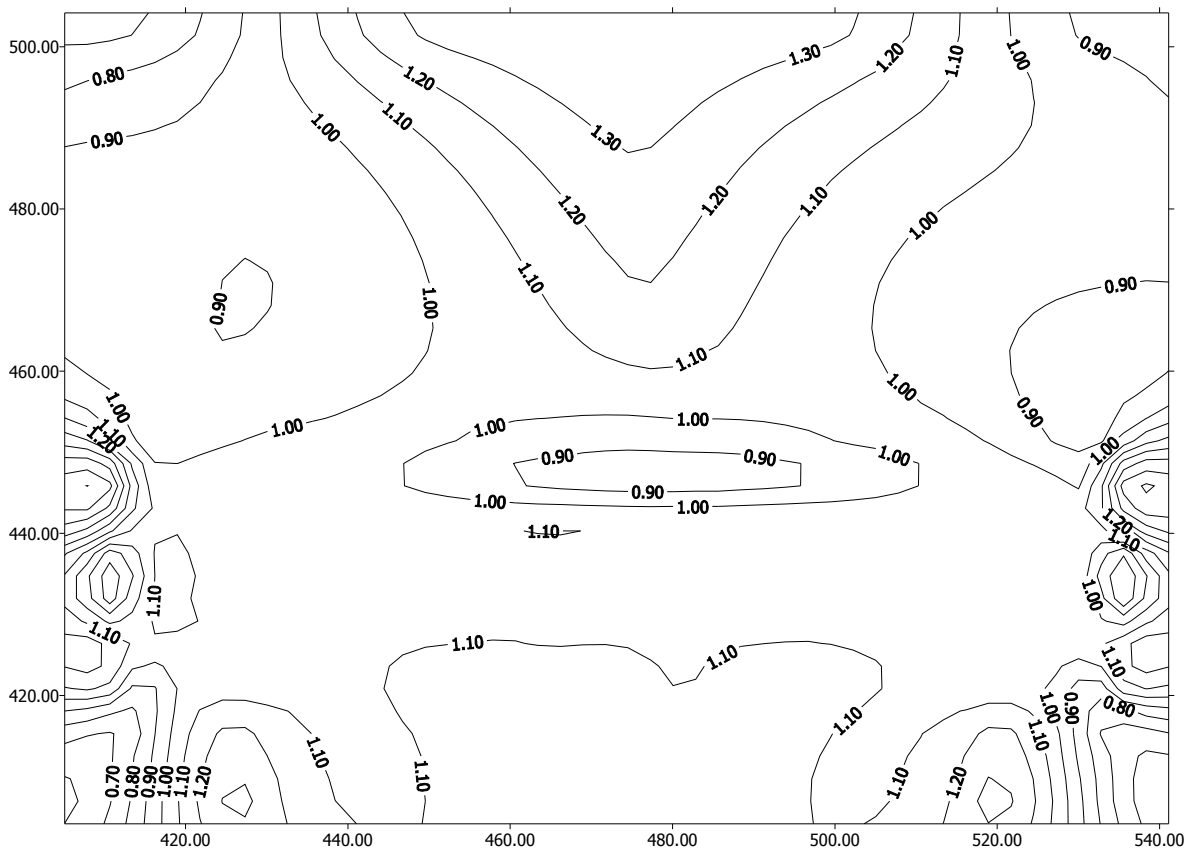


Фиг. 7

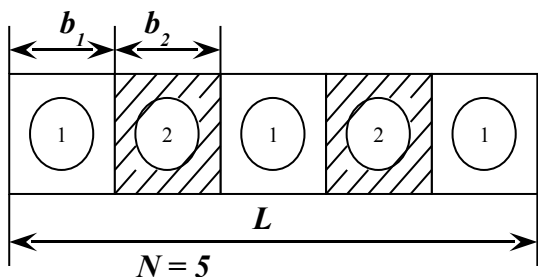
Този израз има важно практическо значение. Той показва, че при по-малък брой на камерите  $N$  относителният дял на първичните камери ще бъде по-голям. Например при  $N=3$ ,  $\Delta_T=0.66$ ; при  $N=15$ ,  $\Delta_T=0.533$ . Известно е, че най-добри показатели на извличане при разработване по схемата камера-целик-камера се постигат при изземване на първичните камери. На фиг.10 е показан характерът на разпределение на коефициента на устойчивост  $FS_{M-C}$  при условие, че са "отворени" всички камери на варианта камера-целик-камера. Прави впечатление, че коефициентът на устойчивост  $FS_{M-C}$  за всички целици се изменя в граници близки до единица. Такъв резултат е неприемлив. Наличието на зони, за които  $FS_{M-C} < 1$  означава, че целиците се разрушават, т.е. те не изпълняват функцията си на поддържащ елемент. Същевременно таванът на камерите е в много по-добро състояние. Това се обяснява с разтоварващия ефект на целика, който се оставя между

два съседни подетажа. В крайна сметка сравнителният анализ показва, че вариантът камера-целик-камера има по-лоши технически показатели. И тъй като изчислителните схеми на двата варианта предвиждат едни и същи начални условия, може да се направи още един съществен извод. Ако все пак се приложи вариантът камера-целик-камера (съображенията са свързани главно със съкратените срокове на изземване на първичните камери), от изключително значение е определянето на оптималната ширина на целиците, т.е. на вторичните камери  $b_2$ . Масивните целици ще осигурят по-голяма устойчивост на конструкцията, но това ще се отрази върху ширината на първичните камери  $b_1$ . Условието  $b_1=b_2$  би означавало неустойчиво състояние на тавана на първичните камери и от там възможните усложнения, свързани с добивните работи в тях.





Фиг. 8



Фиг. 9. Камерно – целикова система на разработване, вариант камера – целик – камера; 1 – първични камери; 2 – вторични камери

## Заклучение

Извършеният анализ на НДС на масива при използване на КЦС на разработване дава основание да се направят следните изводи.

1. Създаден е универсален модел за изследване на НДС на масива по МКЕ. Той се основава на човеко-машинна процедура за полуавтоматично генериране на възлите на изчислителната схема, като дава възможност да се решават многовариантни задачи за условията на мощни рудни тела и в частност при камерно-целикова система на разработване.

2. С помощта на сравнителния анализ са изведени общите закономерности, свързани с изучаване на НДС на масива при камерно-целикова система на разработване. Формирано е множество варианти, основаващо се на решаването на четири типа задачи, пет етапа на изземване на камерите и три алтернативи за развитие на минните работи.

3. При изследване на НДС на масива около добивните изработки задължително трябва да се оцени напрегнатото състояние на ненарушения масив и ориентацията на главните напрежения в него. Отклоненията от хипотезата за геостатичния товар се дължат на нееднородния характер на скалите- литоложки разновидности с различни физико-механични свойства, пресечения терен на повърхността, наличието на тектонски нарушения и др.

4. Втвърдяващото запълнение не може да се превърне в активен поддържащ елемент. Неговата основна функция е да осигури собствената си устойчивост, когато една от стените на изкуствения масив се "отвори". От тази гледна точка изключително значение придобива въпросът за

физикомеханичните свойства на запълнението, тъй като те икономически показатели.

5. Сравнителният анализ показва, че низходящият ред на развитие на минните работи е по-благоприятен от гледна точка на състоянието и поведението на масива, в който предстои да се изземват камерите от следващия подетаж.

6. Сравнителният анализ недвусмислено показва, че вариантът едновременно изземване на 1/5 част от запасите има по-големи предимства в сравнение с варианта камера-целик-камера. Освен това доказано е, че граничната стойност на относителния дял на първичните камери клони към 0.5 при еднаква ширина на първичните и вторични камери. Следователно, по-благоприятен е случаят, когато разглеждания добивен участък е с по-малък брой камери.

Посочените изводи показват, че прилагането на КЦС за разработване на мощни рудни тела е комплексна задача. В нея особено място заема изследването на НДС на масива през различните етапи на разработване. С помощта на МКЕ е възможно да се оцени в каква степен изкуственият масив (запълнението) се превръща в активен поддържащ елемент. Това най-вече се отнася към определяни на неговите физико-механични свойства, тъй като те са решаващи в оценката на технико-икономическата ефективност на добивната технология

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

## Литература

- Трапов, Г., Г Михайлов. Числено моделиране и оценка на устойчивото състояние на открити добивни пространства, създадени в резултат на подземни минни работи. *Годишник на Минно-геоложкия университет "Св.Ив.Рилски", Свитък II. Добив и преработка на минерални суровини.* София, 2004, с.119-124.
- Михайлов, Г., Г.Трапов и др. Применение Метода конечных элементов при определении параметров камерно-столбовой системы разработки. *Международная конференция к 60 летию Горно-геологического института ЗСФ АН СССР, Института горного дела СОРАН, 1-5 ноября 2004 года, Новосибирск. "Проблемы и перспективы развития горных наук".* Изд. Новосибирск 2004.
- Именитов, В.Р. *Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений.* Недра, Москва, 1984, с.504.
- SME Mining Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition, Volume 2.* Senior Editor Howard Hartman. Published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. Littleton, Colorado. 1992.