УДК 622.284

А.Д.КУРАНОВ, *аспирант, kuranov@spmi.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.D.KURANOV, *post-graduate student, kuranov@spmi.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА БЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ВЫСОКОНАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ

Приведена методика определения безопасных параметров конструктивных элементов систем разработки рудных месторождений применительно к целикам различного назначения. Показаны примеры реализации методики для условий разработки месторождения Южное Эльконского ураново-рудного района.

***Ключевые слова*:** метод конечных элементов, параметры систем разработки, тектонические напряжения.

APPLICATION OF NUMERICAL MODELING FOR DESIGN OF SAFETY PARAMTERS OF SAFETY MINING METHOD IN HIGHLY STRESSED MASSES

A method for determining the parameters of sound design elements of systems development of ore deposits in relation to a whole different purpose. Showing examples of methods for the conditions of ore deposit Yuzhnoe, Elkon uranium district.

***Key words*:** finite element method, parameters of mining method, tectonic stresses.

Разработка рудных месторождений сопряжена с рядом факторов, учет которых при выборе безопасных параметров конструктивных элементов систем разработки позволит в значительной мере повысить безопасность ведения подземных работ. Комплексный учет этих факторов при использовании классических методик расчета затруднителен, поэтому целесообразно на некоторых этапах расчета применять численные методы анализа, которые находят все большее применение при решении задач геомеханики [1, 2].

Для комплексного учета факторов, влияющих на устойчивость конструктивных элементов систем разработки, предлагается использовать методику расчета, предусматривающую выполнение следующих этапов (применительно к целикам различного назначения):

1) формирование конечно-элементных моделей прогноза напряженного состояния целиков с учетом действия тектонического поля напряжений, наличия (отсутствия) закладки, размеров камер (выработок), размеров целиков и глубины разработки;

2) определение средней величины полных нормальных напряжений в целиках различных размеров;

3) аппроксимация полученных величин средних полных напряжений в целиках от их ширины для ряда глубин разработки и интерполяция полученного результата для всех потенциальных глубин разработки;

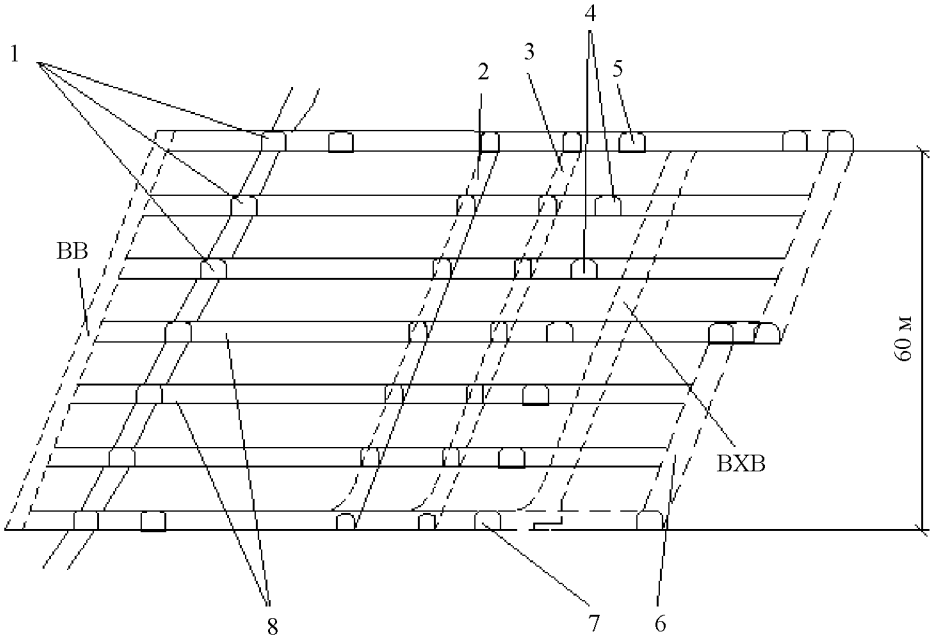


Рис.1. Система разработки подэтажными штреками: разрез вкрест простирания

1 – буродоставочные штреки; 2 – рудоспуск; 3 – породоспуск; 4 – подэтажные штреки; 5 – вентиляционный штрек; 6 – блоковый автосъезд; 7 – транспортный штрек; 8 – подэтажные орты

4) определение несущей способности целиков для различных условий их работы в зависимости от глубины разработки и горно-технических факторов;

5) сопоставление полных нормальных напряжений в целиках с их несущей способностью и определение значений безопасных размеров целиков.

При этом несущая способность целика [3]

$$\sigma_{Z\,кр} = \frac{k_{закл}}{k_з}\eta k_с \sigma_{сж},$$

где $k_з$ – коэффициент запаса; $k_{закл}$ – коэффициент, учитывающий повышение устойчивости целика посредством закладки; η – коэффициент, учитывающий изменение прочности руды в целике в зависимости от формы целика; $k_с$ – коэффициента структурного ослабления; m – высота целика; $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на одноосное сжатие.

Примером использования данного метода является определение безопасных размеров целиков различного назначения при разработке месторождения Южное Эльконского урановорудного района. Эльконский урановый регион находится в северо-восточной части Алданского района Республики Саха (Якутия). В настоящее время месторождения Эльконского урановорудного района разрабатываются двумя способами: системами разработки подэтажными штреками и слоевыми системами с закладкой. С позиций геомеханики и перспектив обеспечения устойчивости первый способ сопряжен с большими сложностями, поэтому исследование напряженного состояния целиков различного назначения и обеспечения их устойчивости весьма актуально (рис.1).

Первостепенной задачей является определение безопасных параметров целиков между выработками различного назначения при отработке сближенных рудных тел. Для этого разработан ряд плоских конечно-элементных моделей. Общий вид моделей приведен на рис.2, размеры модели 80 × 80 м; высота камер 35 м, ширина выработок 3,8 м, высота 3,2 м, минимальный линейный размер элемента 0,2 м, максимальный – 2 м.

Все материалы в конечно-элементной модели задаются как весомые, изотропные, однородные, линейно деформируемые. Де-

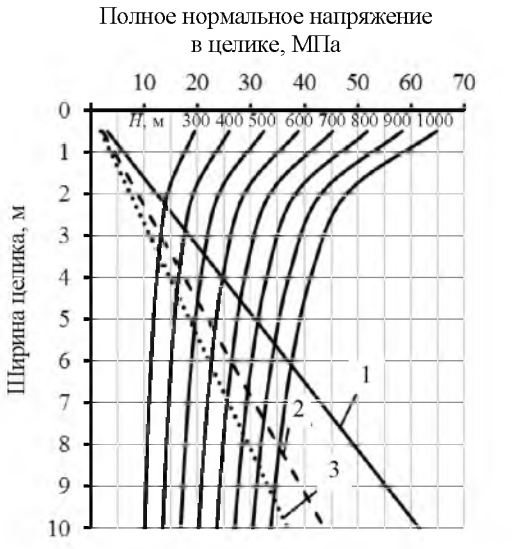


Рис.2. Совмещенный график полных напряжений в целиках и критерий прочности целиков между параллельными нарезными выработками

1 – устойчивые породы; 2 –умеренно устойчивые породы; 3 – породы зон интенсивной трещиноватости

формационно-прочностные и механические свойства материалов следующие: модуль упругости пород $E = 72300$ МПа; коэффициент Пуассона пород $\nu = 0{,}21$; удельный вес пород 0,026 МН/м^3; предел прочности устойчивых пород $\sigma = 35{,}2$ МПа; предел прочности умеренно устойчивых пород $\sigma = 25{,}0$ МПа; предел прочности пород в зонах интенсивной трещиноватости $\sigma = 21{,}1$ МПа; модуль упругости закладки $E = 18000$ МПа; коэффициент Пуассона закладки $\nu = 0{,}21$; объемный вес закладки 0,025 МН/м^3. Вес пород рассматриваемой панели и тектоническое поле напряжений задавались с учетом компонентов тектонического поля напряжений: вкрест простирания ($\sigma_x = 2\gamma H$) и по простиранию ($\sigma_y = 0{,}3\gamma H$) рудного тела.

Конечно-элементное моделирование включает ряд расчетных этапов:

1) формирование напряженно-деформированного состояния нетронутого массива с учетом тектонического поля напряжений;

2) проведение выработки;

3) закладка выработки (в случае ее применения);

4) проведение параллельной выработки.

Анализ результатов моделирования показал следующее:

• в массиве висячего бока камеры формируются две характерные зоны напряжений: в верхней части висячего бока камеры – зона минимальных сжимающих напряжений, в нижней части висячего бока камеры – зона концентрации сжимающих напряжений;

• в массиве лежачего бока камеры обратная ситуация: в верхней части лежачего бока камеры формируется зона максимальных сжимающих напряжений, в нижней части лежачего бока камеры – минимальных сжимающих напряжений;

• кровля и подошва камеры также имеют зону концентрации и зону разгрузки.

Указанные особенности связаны с преобладанием горизонтальной составляющей напряжений над вертикальной в плоскости вкрест простирания.

Для выбора допустимых расстояний между выработками различного назначения необходимо использовать график, приведенный на рис.2.

Минимально допустимые расстояния между выработками и камерами соответствуют точкам пересечения графика критерия несущей способности целиков и кривых графика полных нормальных напряжений. Аналогичным образом выполняется построение графиков для всех расчетных вариантов и в результате определяются минимально допустимые расстояния между выработками различного назначения при разработке сближенных рудных тел для всех рассматриваемых расчетных вариантов (табл.1).

Далее необходимо определить безопасные параметры междукамерных целиков в секциях по направлению простирания рудного тела. В отличие от целика между камерами и выработками вкрест простирания, рассмотрение плоской модели невозможно. Поэтому разработан ряд пространственных моделей (рис.3). Размеры модели 4270 × 840 × 840 м. Граничные и начальные условия аналогичны принятым для расчета целиков при отработке сближенных рудных тел.

Таблица 1

Минимально допустимые расстояния (м) между выработками различного назначения при разработке сближенных рудных тел

Глубина отработки, м	Породы		
	Устойчивые	Умеренно устойчивые	Неустойчивые
	Между бортами нарезных выработок (числитель) и бортами выработок, одна из которых заложена (знаменатель)		
400	3,00 / 1,55	3,80 / 2,08	4,40 / 2,38
600	4,00 / 2,17	5,30 / 2,92	6,10 / 3,40
800	5,10 / 2,79	6,70 / 3,78	7,75 / 4,40
1000	6,10 / 3,41	8,10 / 4,60	9,30 / 5,35
	Между бортом камеры и бортом выработки (числитель), бортом заложенной камеры и бортом выработки (знаменатель)		
400	4,05 / 2,30	5,35 / 3,03	6,10 / 3,48
600	5,62 / 3,20	7,30 / 4,20	8,27 / 4,80
800	7,00 / 4,03	9,00 / 5,26	10,17 / 5,98
1000	8,25 / 4,78	10,55 / 6,23	11,90 / 7,08
	Между бортами камер (числитель) и бортами камер, одна из которых заложена (знаменатель)		
400	9,4 / 5,7	10,5 / 6,3	11,4 / 6,8
600	12,7 / 7,9	14,5 / 8,8	15,5 / 9,6
800	15,8 / 10,1	17,8 / 11,3	18,8 / 12,2
1000	18,3 / 11,9	20,6 / 13,5	21,8 / 14,5

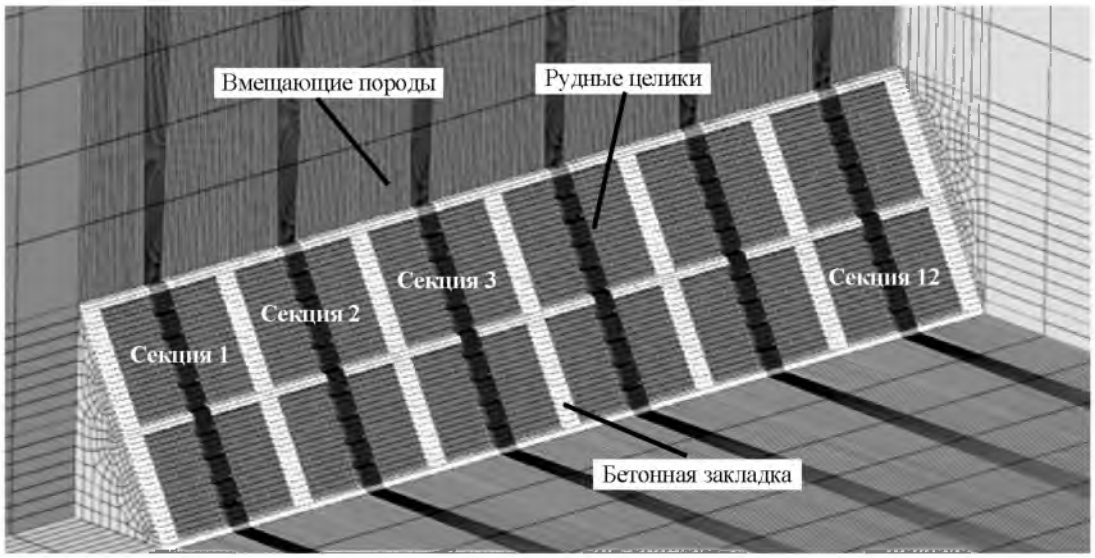


Рис.3. Общий вид разработанных конечно-элементных моделей

Моделирование включает семь расчетных этапов: формирование НДС нетронутого массива; выемка руды 1-й секции; формирование искусственных целиков 1-й секции; выемка руды 2-й секции; формирование искусственных целиков 2-й секции; выемка руды 3-й секции; формирование искусственных целиков 3-й секции.

Подобная постановка задачи позволяет получить максимально возможные напряжения в рудных целиках, с одной стороны, за счет учета гравитационного и тектонического полей напряжений в массиве, с другой – за счет постепенного введения элементов закладки, установить напряжения в закладке, вызываемые только горными работами, а

именно увеличивающимся обнажением висячего бока.

На основании результатов моделирования для всех рассматриваемых расчетных вариантов графоаналитическим способом (рис.3) определены допустимые размеры целиков между выработками различного назначения (табл.2).

Таблица 2

Выбор минимально допустимой ширины целика, м

Глубина отработки, м	Минимальная ширина междукамерного целика при размере по восстанию 9 м		
	Устойчивые породы	Умеренно устойчивые породы	Неустойчивые породы
300	6,00	7,80	9,00
500	8,80	11,15	12,40
700	11,20	13,55	14,90
900	12,90	15,50	16,80

Таким образом, приведенная методика определения ширины целиков между выработками различного назначения позволяет учитывать широкий диапазон влияющих факторов и может быть использована при обосновании параметров конструктивных элементов систем разработки при эксплуатации удароопасных рудных месторождений в различных горно-геологических и горно-технических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карасев М.А.* Эффективное применение численных методов анализа для решения задач геомеханики // Записки Горного института. СПб, 2010. Т.185. С.161-165.

2. *Огородников Ю.Н.* Геомеханическое обоснование устойчивости подготовительных выработок при разработке прибортовых запасов Коашвинского карьера с обрушением подрабатываемого борта / Ю.Н.Огородников, А.Д.Куранов // Записки Горного института. СПб, 2011. Т.190. С.240-244.

3. *Сидоров Д.В.* Оценка напряженного состояния междуштрековых целиков на рудниках ОАО «Апатит» / Д.В.Сидоров, А.Д.Куранов // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Серия Науки о Земле. Тула, 2011. Вып.1. С.308-312

REFERENCES

1. *Karasev M.A.* Efficient numerical methods for geonechnical problems / Proceedings of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2010. Vol.185. P.161-165.

2. *Ogorodnikov J.N.*, *Kuranov A.D.* Geomechanical substantiation of the stability of development workings in the development of reserves pribortovyh Koashvinskogo career with the collapse of the undermined side // Proceedings of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2011. Vol.190. P.240-244.

3. *Sidorov D.V.*, *Kuranov A.D.* Assessment of stress pillars in the mines of Open Society «Apatite» // Proceedings of Tula State University. Natural Sciences. Series Earth Science. Tula, 2011. Issue.1. P.308-312.

Научный руководитель д-р техн. наук, профессор *А.Г.Протосеня*