

УДК 622.831

Чжун Чан, В.И. Голик, В.Б. Заалишвили
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР

Дан анализ связи горных работ с сейсмическими и гравитационными полями напряжений. Определен комплекс геомеханического обеспечения горных работ. Приведены результаты моделирования вариантов технологий управления массивом, различающиеся учетом геодинамики. Сформулирован феномен потери устойчивости как сложение потенциала энергии упругого сжатия пород и энергии упругих деформаций в процессе горных работ.

Ключевые слова: динамика, устойчивость, горные породы, деформации, горные работы, напряжения, месторождение, геомеханика, сейсмика, литосфера, оптимизация.

Анализ геологических предпосылок формирования литосферы характеризует сложно-структурный массив как среду с закономерно изменяющимися энергетическими характеристиками. Поведение такой среды при нарушении природного геодинамического баланса адекватно сопровождается перераспределением энергии и высвобождением ее при превышении предельных для данных условий параметров.

Наиболее опасные проявления горного давления происходят на участках сочленяющихся структурных нарушений, сложенных прочными, но разрушенными и ослабленными породами.

Эффективность разработки сложноструктурных месторождений во многом определяется уровнем технологически создаваемых напряжений в целиках, горных выработках и сводах нарушенных пород над ними, формирующихся под влиянием техногенных и природных факторов

Перераспределяющиеся в процессе горных работ напряжения вызывают хрупкое разрушение слагающих массив пород. Если первичное поле

напряжений зависит от гравитационных и тектонических сил, действующих в массиве, то вторичное – определяется технологией разработки.

Горные выработки существуют в сейсмических и гравитационных полях напряжений, образованных естественными и техногенными динамическими явлениями, и реагируют на изменение параметров полей в результате взаимодействия природной и техногенной сейсмики.

Одной из важных причин деформаций массива является возникновение собственных колебаний в породах, которые под воздействием сейсмики вибрируют и отслаиваются по контактной поверхности даже при слабых землетрясениях в окрестностях массива [1].

В литосфере Земли перманентно происходят динамические явления, в том числе землетрясения малых масштабов. Любое горнотехническое сооружение в течение всего срока своего существования находится в поле напряжений и перемещений, вызванных сейсмическим действием естественных и техногенных динамических

явлений, например, вызванных взрывами.

В результате сейсмических воздействий в выработках возникают знакопеременные напряжения, усиливающие гидростатические напряжения, также имеющие максимумы в данных областях. Во времени этот процесс характеризуется тем, что напряжения одного знака возникают в противоположных углах целика: с одной стороны у контакта с потолочиной, с другой стороны у основания.

Хотя интенсивность динамических напряжений намного меньше статических напряжений, их роль в механизме разрушения значительна, тем более, что в отдельных участках целика одновременно действуют положительные и отрицательные напряжения.

Динамический характер потери устойчивости объясняется сложением потенциала энергии упругого сжатия пород и энергии упругих деформаций в процессе горных работ, поэтому профилактика динамических процессов обеспечивается минимизацией напряжений посредством раскройки месторождения на геомеханически безопасные участки.

Одним из основных вопросов эксплуатации месторождения является выбор параметров управления природными и искусственно созданными в его границах массивами. Если массив представляет собой систему напряжений, сконцентрированных в краевых частях выработок и над целиками, и увязана с полями напряжений рядом расположенных участков, то появляется возможность управлять его состоянием, применяя ориентированные на учет напряженности и деформаций технологии добычи руд.

Управление состоянием массива состоит в регулировании уровня напряжений и деформаций путем на-

значения достаточных по размерам и прочности несущих элементов. Оно сводится к созданию таких условий, при которых напряжения в элементах массива не превышают критических и не сопровождаются разрушающими массив деформациями.

Решение задачи управления массивом предполагает раскройку шахтного поля на геомеханически сбалансированные участки с помощью целиков, которые могут упрочняться технологическими средствами [2].

При подземной разработке месторождений основную роль в управлении массивом играют рудные целики, оставляемые в местах потенциальных критических напряжений и деформаций. При использовании интенсивных вариантов систем разработки запас руды в целиках увеличивается, увеличивая невосполнимые потери при оставляемых целиках и одновременно потери и разубоживание в извлекаемых целиках.

Напряжённое состояние узких междокамерных столбчатых и ленточных целиков является, соответственно, одноосным или двухосным. Вблизи массивных панельных или барьерных целиков и границ залежи они разгружены от горного давления.

В широких целиках распределение напряжений по сечению неравномерно и зависит от механических свойств материала целика, почвы и кровли. В целиках, сложенных крепкими, хрупкими породами, напряжения концентрируются у стен. В пластичных породах у стенок целика напряжения уменьшаются. В средней части широкого целика образуется ядро, находящееся в объёмном напряжённом состоянии, что повышает несущую способность целика. Это дает возможность изменять размеры целика в соответствии с действующими напряжениями.

Сверхзадачей системы управления состоянием природно - технической геосистемы является оптимизация внутренних отношений энергетических потоков внутри системы по критериям эффективности, безопасности и полноты использования недр.

Управление состоянием массива сводится к такому решению модели, при котором обеспечивается не превышение напряжений некоторой критической для данных пород величины. Зона, в пределах которой это условие обеспечивается, находится под защитой рудного тела и состояние массива безопасно.

Недостатком большинства расчетов является то, что исходные данные для них получаются в ходе технологического воздействия на массив и уже отражают начальную фазу реакции массива на вторжение в него. Исходя из приоритета охраны труда, параметры управления массивом нередко завышают введением коэффициента запаса, что сопровождается увеличением невозполнимых потери при оставаемых целиках и одновременных потерь и разубоживания при извлечении целиков.

Более точные результаты прогноза поведения дает метод конечных элементов, рассматривающий массив как совокупность дискретных элементов, границы которых определяются узловыми точками, и предполагающий, что реакция континуума на внешнее воздействие может быть описана реакцией узловых точек.

Параметры устойчивости массива могут быть оптимизированы уже на стадии пред- проектного прогноза на основании исследования условий разработки месторождения.

Одной из задач прогнозирования является оценка сейсмоопасных участков литосферы с использованием инженерно-геологических исследова-

ний и ретроспективной информации при комплексном учете природных и техногенных факторов эксплуатации месторождений.

Комплекс геомеханического обеспечения горных работ включает наблюдения за состоянием горного массива и их интерпретацию, в т.ч.:

- анализ и прогноз геомеханических последствий работ с учетом полей напряжений, деформаций, коэффициента опережения выработок;
- оценку несущей способности и удароопасности целиков;
- определение технологий и объема заполнения пустот материалами;
- разработку мероприятий по предотвращению разрушения массива.

Оценка устойчивости целиков проводится по критическим нагрузкам и несущей способности целиков сравнением расчетных деформаций с фактическими. Методика отличается от известных тем, что расчет параметров горных работ ведется по условию не превышения критических значений напряжений [3].

Условия применения методики:

- породы с упругими свойствами и способностью к хрупкому разрушению;
- напряжения в нетронутом массиве соизмеримы с прочностью на сжатие;
- склонность пород к динамическим формам проявления горного давления.

Параметрами управления состоянием массива являются: h - высота зоны влияния горных работ на массив, м; b - ширина целика, разделяющего массив на участки, м; l - пролет безопасного участка заклинивания пород, м.

Для условий Садонского месторождения нами сравниваются варианты технологий управления массивом: 1-й вариант – на основе традиционных расчетов без учета сейсмичности и 2-й ва-

риант – на основе уточненных расчетов с учетом сейсмики.

При 1-м варианте потери имеют большую величину, потому что назначаются с запасом в 1,15-1,5 раза. Исходя из повышенной несущей способности целика, выбирается больший допустимый пролет обнажения кровли. Игнорирование потенциальной возможности сейсмических колебаний приводит к тому, что ослабление целика сопровождается повышенным разубоживанием руды вмещающими породами.

При 2-м варианте с учетом потенциальной возможности сейсмических колебаний размеры целиков могут быть и больше и меньше полученных по 1-му варианту, но разубоживание будет меньше за счет оптимизации размеров целика и опирающегося на него пролета очистной выработки.

Геометризованная модель, имитирующая рудное поле месторождения «Джимидон», разделена на геомеханические участки с помощью целиков и очистных пространств между ними. Параметры разделения рассчитаны 2-мя сравниваемыми методами.

Исходные данные для расчетов:
 $H' = 60$ м; $h_n = 20$ м; $h = 15$ м;
 $L_{\phi} = 225$ м; $m = 6$ м; $\alpha = 80^\circ$;
 $\varphi = 50^\circ$; $d_1 = d_2 = 1,0$ м;
 $R'_{сж} = R''_{сж} = 600$ кг/см²; $\gamma = 2,7$ т/м³.

Оптимизация параметров управления массивом осуществляется повышением их точности за счет введения коэффициента, учитывающего природную и наведенную сейсмичность K_c :

$$K_c = 1 + \frac{\sigma_c}{\gamma H},$$

где γ - объемный вес пород, т/м³; H - глубина работ; σ_c - амплитуда динамических напряжений в массиве:

$$\sigma_c = \rho c v_0,$$

где c - скорость распространения в массиве продольной сейсмической волны, м/с; ρ - плотность пород; v_0 - амплитуда скорости смещения частиц: 0,08 м/с, 0,16 м/с и 0,32 м/с для сейсмической интенсивности 7, 8 и 9 баллов соответственно.

Сейсмический коэффициент представляет собой отношение полного давления к давлению без учета сейсмической составляющей и вводится в расчетные формулы как коэффициент, понижающий прочность пород на сжатие: $\sigma_{сж} = \sigma_{сж}/K_c$.

Для 8-балльной зоны из условий $v_0 = 0,16$ м/с, модуль упругости и коэффициент Пуассона $E = 6 \cdot 10^{10}$ Па, и $\mu = 0,2$ скорость распространения продольной сейсмической волны в массиве:

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} = \frac{0,2 \cdot 6 \cdot 10^{10}}{(1 + 0,2)(1 - 2 \cdot 0,2)} = 1,67 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = \frac{6 \cdot 10^{10}}{2(1 + 0,2)} = 2,5 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2,$$

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,67 \cdot 10^{10} + 2 \cdot 2,5 \cdot 10^{10}}{2,7 \cdot 10^3}} = 4970 \text{ м/с}$$

$$\sigma_c = \rho c v_0 / 2 = 2,7 \cdot 10^3 \cdot 4970 \cdot 0,16 / 2 = 1,05 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,05 \text{ МПа}$$

Сейсмический коэффициент:

$$K_c = 1 + \frac{\sigma_c}{\gamma H} = 1 + \frac{1,05 \cdot 10^6}{2,7 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 500} = 1,08$$

Сравнение расчетов по базовому варианту и с учетом сейсмического коэффициента (рисунок) показывает, что с увеличением ширины камер расхождение становится большим - ширина целика должна быть увеличена по сравнению с базовым вариантом.

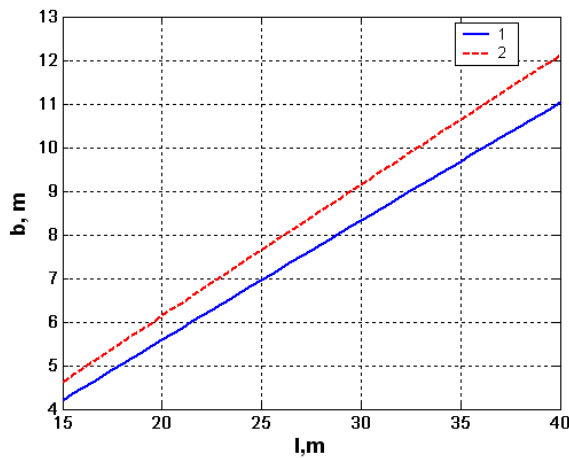


Таблица 1

Параметры управления массивом

Методы расчета	Параметры элементов управления, м		
	блоковые цели	пролеты обнажений	высота зоны влияния
Без учета сейсмики	6,7	24	12
С учетом сейсмики	6,1	20	10

Если принять размеры целика постоянной величиной, учет сейсмического коэффициента приводит к уменьшению ширины камер, причем на большую величину по сравнению с увеличением размера целика. Оптимум достигается при незначительном уменьшении величины b с одновременным уменьшением l , но на меньшую величину, чем при постоянном b .

Итоги оптимизации параметров управления с учетом геодинамики сведены в табл. 1.

Потери в целиках уменьшились, несмотря на введение коэффициента сейсмичности, потому что исчезла необходимость в коэффициенте запаса ввиду повышения точности расчета:

$$100 - \frac{b_a}{b_6} = 100 - \frac{6,1}{6,7} \cdot 100 = 9,1\%$$

Параметры управления массивом: без учета сейсмического коэффициента (сплошная линия 1) и с учетом его (пунктирная линия 2)

Разубоживание руды породами, отслаивающимися в пределах пролетов выработок, уменьшилось, несмотря на введение коэффициента сейсмичности, потому что реальная ширина целиков увеличилась:

$$100 - \frac{l_a}{l_6} = (100 - \frac{20}{24})100 = 17\%$$

При экономическом моделировании возможностей сравниваемых методов управления массивом использованы данные Садонского свинцово-цинкового комбината (табл. 2).

Экономическая эффективность оптимизированного варианта на 7% превышает показатель базового варианта, несмотря на некоторое удорожание работ (5%) при разделении месторождений на геомеханически сбалансированные участки.

Снижение ущерба от потерь руды и ее разубоживания налегающими и боковыми породами компенсирует увеличение затрат на подготовку и нарезку рудного тела.

Снижение ущерба от потерь руды и разубоживания компенсирует увеличение затрат на добычу за счет повышения надежности расчетов и формирует прибыль.

Выводы

1. Динамический характер потери устойчивости объясняется сложением потенциала энергии упругого сжатия пород и энергии упругих деформаций в процессе горных работ, поэтому профилактика динамических процессов обеспечивается минимизацией

Таблица 2

Моделирование экономических показателей

Показатели	Единицы	Варианты	
		1	2
Балансовые запасы руд	тыс. т	100	100
Содержание металла в запасах	%	4	4
Количество металла в запасах	тыс. т	4	4
Потери руды в целиках	%	20	18
Разубоживание руды	%	40	33
Количество добываемой горной массы	тыс. т	120	115
Количество металла в горной массе	тыс. т	3,2	3,3
Содержание металла в горной массе	%	2,7	2,9
Извлекаемая ценность 1 т добытых металлов	т. руб.	24	24
Стоимость добытых металлов	т. руб.	76800	79200
Затраты на добычу 1 т горной массы	т. руб.	6	6,3
Затраты на добычу руд при горном переделе	т. руб.	72000	72500
Прибыль от добычи руд	т. руб.	6320	6700
Удельная прибыль от добычи 1 т металлов	т. руб./т	2,0	2,03
Удельная прибыль на 1т запасов руды	руб./т	6,3	6,7
Экономический эффект на 1т запасов руды	%	100	107

напряжений посредством раскройки месторождения на геомеханически безопасные участки.

2. Контроль сейсмоопасных участков литосферы осуществляется путем оптимизации методов оценки динамической опасности при комплексном учете природных и техногенных факторов эксплуатации месторождений.

3. Управление состоянием массивов основывается на учете сопря-

женного действия гравитационных, тектонических и сейсмических сил природно-техногенного происхождения.

4. Задачей системы управления состоянием массива является оптимизация внутренних отношений энергетических потоков внутри системы по критериям эффективности, безопасности и полноты использования недр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельков Д.А., Заалишвили В.Б. Моделирование параметров управления массивом при подземной разработке месторождений. М. 2008.12 с. Деп. в МГГУ. 12.09.08. № 659/11-08.

2. Исмаилов Т.Т., Логачев А.В., Голлик В.И. Геодинамические процессы в

скальных массивах. МГГУ. ГИАБ. 2008. №11.

3. Мельков Д.А. Концепция оптимизации параметров управления массивом. орный информационно-аналитический бюллетень. №12. 2008. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Чжун Чан – Китайский геологический университет (Пекин), , clockzc@mail.ru.

Голлик В.И. – профессор, доктор технических наук, Центр геофизических исследований РАН, г.Владикавказ, РСО - Алания, v.i.golik@mail.ru.

Заалишвили В.Б. – профессор, доктор физико-математических наук, Центр геофизических исследований, г.Владикавказ, РСО- Алания, zaal@mail.ru.