

В.В. Русских, С.А. Зубко, И.А. Карапа, А.В. Яворский

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ВЫСОТОЙ В ДВА ЭТАЖА

На моделях из эквивалентных материалов выполнены исследования процессов деформирования прилегающего к выработанному пространству массива горных пород при отработке междукammerных целиков высотой в два этажа между залеженными камерами в отметках 640-840 м.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ МІЖКАМЕРНИХ ЦІЛИКІВ ЗАВВИШКИ ДВА ПОВЕРХИ

На моделях з еквівалентних матеріалів виконані дослідження процесів деформування прилеглого до виробленого простору масиву гірських порід при відпрацюванні міжкammerних ціликів заввишки два поверхи між закладеними камерами у відмітках 640-840 м.

RESEARCH OF GEOMECHANICS PROCESSES DURING INTERCHAMBER PILLAR DEVELOPMENT WITH TWO FLOOR HEIGHT

The research of deformation processes of the rock mass adjacent to the worked-out areas during working interchamber pillars with height of two levels laid down between the chambers at 640-840 m is conducted on models of equivalent materials.

ВВЕДЕНИЕ

Отработка Южно-Белозерского месторождения в настоящее время осуществляется двумя фронтами в этажах 301-330 м и 640-840 м камерной системой с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Этажи в интервале глубин 340-840 м отрабатываются с 1970 года. За это время произошло разделение зон влияния верхнего и нижнего фронтов отработки и осушение рудопородного массива в этаже 301-330 м. Отработка этажа 301-330 м осуществляется под предохранительным целиком высоконапорного водоносного горизонта при низких уровнях напряженного состояния массива, этажа 640-

840 м – при уровнях близких к предельным по условию устойчивости в южном крыле и низких в северном.

Цель работы – обеспечение устойчивости конструктивных элементов системы «камера-целик» при отработке залежей высокими камерами.

Крупномасштабная разработка железорудных месторождений системами с твердеющей закладкой выработанного пространства, осуществляемая на Запорожском ЖРК, является пионерной. В связи с этим изыскание путей обеспечения рентабельности производства за счет снижения потерь и засорения руд, связанных с устойчивостью камер, является актуальной задачей.

РАЗРАБОТКА СХЕМ И ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Исследования на моделях из эквивалентных материалов при соблюдении подобия модели натурным условиям [1, 2, 3, 4] позволяют получать данные об устойчивости элементов систем разработки при различных воспроизводимых на моделях формах и размерах выработанных пространных.

Моделирование методом эквивалентных материалов заключается в следующем:

– для достижения механического подобия модель изготавливается из материалов, свойства которых эквивалентны физико-механическим свойствам материалов натуре. Такие соотношения определяются на основании общего закона силового подобия с учетом одновременного действия сил тяжести и внутреннего напряжения.

Геометрическое подобие модели натуре будет выполняться в том случае, если все размеры пространства, занятого изучаемой системой в модели, а также ее отдельных элементов будут изменены в определенное число раз по сравнению с размерами пространства, занятого подобной системой в натуре. Признаки геометрического подобия запишутся в виде отношения линейных размеров:

$$\alpha_e = \frac{L}{l}, \quad (1)$$

где α_e – геометрический масштаб моделирования;

L – линейный размер моделируемого элемента в натуре;

l – линейный размер соответствующего моделируемого элемента в модели.

Для обеспечения подобия механических процессов в модели натурным механические характеристики эквивалентного

материала должны удовлетворять требованиям:

$$N_m = \frac{l}{L} \frac{\gamma_m}{\gamma_n} N_n, \quad (2)$$

где N_m и N_n – соответственно механические характеристики эквивалентного материала модели и материала натуре;

γ_m и γ_n – соответственно объемный вес материала модели и натуре.

Учитывая признаки геометрического подобия и подобия механических процессов и имея данные механических характеристик моделируемых горных пород, выражающихся в численных значениях N_n , для заданного масштаба моделирования $\frac{\gamma_m}{\gamma_n}$ рассчитываются числовые значения соответствующих характеристик механических свойств материала модели, которые необходимы для обеспечения подобия.

Моделирование эквивалентными материалами выполняется на плоском стенде с передней прозрачной стенкой. Параметры модели: длина – 140 см, высота – 125 см, ширина – 24 см.

На рис. 1 приведена схема модели из эквивалентных материалов в масштабе 1:500. Масштаб модели выбран таким образом, чтобы параметры выработанного пространства обеспечивали необходимую точность определения величин деформаций в массиве горных пород с соблюдением граничных условий, а также механического и геометрического подобия.

Так при моделировании всего массива горных пород в масштабе 1:500 высота стенда должна составить 170 см. Отсутствующая в модели часть массива горных пород должна быть компенсирована пригрузкой.

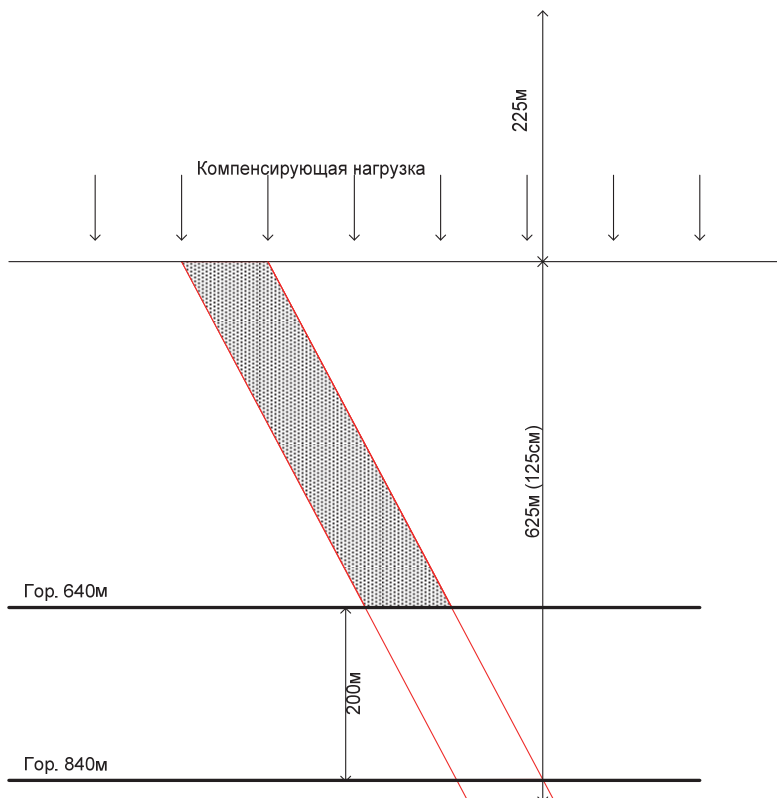


Рис. 1. Схема модели отработки междукамерного целика высотой в два этажа между заложеными камерами в отметках 640-840 м в масштабе 1:500

В модели налегающая толща горных пород (высотой 225 м в натуре или 45 см на модели) компенсируется нагрузкой 18 кг, прилагаемой к каждой пластине. Величины нагрузок, компенсирующих отсутствие налегающей толщи горных пород, рассчитаны с учетом использования рычага 2-го рода (рис. 2) по формуле:

$$P_1 L_1 = P_2 L_2 + \dots + P_n L_n, \quad (3)$$

где $P_1 \dots P_n$ – нагрузка, прилагаемая к пластине на плече рычага, кг;

$L_1 \dots L_n$ – длина плеча, см.

Величина нагрузки, прилагаемой к каждой пластине, определяется по формуле:

$$P_n = (H_n M - H_m) \gamma_m S_m, \quad (4)$$

где P_n – нагрузка, прилагаемая к n -й пластине, кг;

H_n – высота исследуемого массива горных пород, см;

M – масштаб модели;

H_m – высота стенда, см;

γ_m – удельный вес эквивалентного материала, г/см³;

S_m – площадь пластины, см².

Расчет компенсирующих нагрузок приведен в таблице 1.

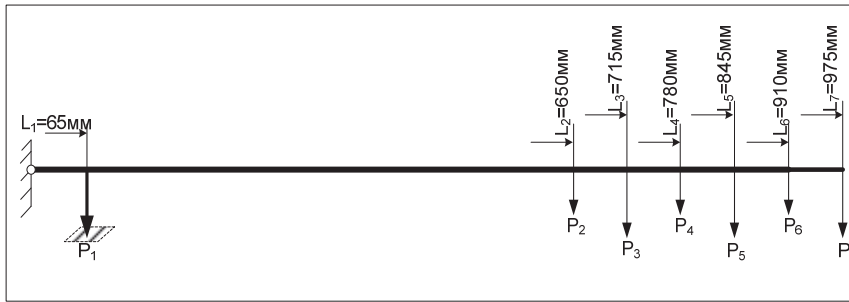


Рис. 2. Схема рычага 2-го рода для компенсирования нагрузки

Для подбора материалов в зависимости от линейного масштаба моделирования определены характеристики эквивалентных материалов по формулам:

$$\sigma_{пчрм} = \frac{l}{L} \frac{\gamma_M}{\gamma_H} \sigma_{пчрн}; \quad (5)$$

$$\sigma_{пчсм} = \frac{l}{L} \frac{\gamma_M}{\gamma_H} \sigma_{пчсн}; \quad (6)$$

$$C_M = \frac{l}{L} \frac{\gamma_M}{\gamma_H} C_H; \quad (7)$$

$$tg \varphi_M = tg \varphi_H; \quad (8)$$

$$\mu_M = \mu_H; \quad (9)$$

$$E_M = \frac{l}{L} \frac{\gamma_M}{\gamma_H} E_H, \quad (10)$$

где L, l – линейные размеры соответственно в натуре и на модели;

γ_H, γ_M – объемный вес горных пород в натуре и на модели;

$\sigma_{пчрн}, \sigma_{пчрм}$ – предел прочности на растяжение горных пород в натуре и на модели;

$\sigma_{пчсн}, \sigma_{пчсм}$ – предел прочности на сжатие горных пород в натуре и на модели;

C_H, C_M – сцепление горных пород в натуре и на модели;

φ_H, φ_M – угол внутреннего трения в натуре и на модели;

μ_H, μ_M – коэффициент Пуассона в натуре и на модели;

E_H, E_M – модуль Юнга в натуре и на модели.

КОМПЕНСИРУЮЩИЕ НАГРУЗКИ

Таблица 1

Параметр	Масштаб 1:500
Компенсируемая высота в натуре/модели, м/см	225/45
Недостающий вес на одну пластину, кг	18
Компенсирующий момент для плеча $L_1 = 65$ мм, кг·см	117
Нагрузка для плеча $L_2 = 650$ мм, кг	1,8
Нагрузка для плеча $L_3 = 715$ мм, кг	1,6
Нагрузка для плеча $L_4 = 780$ мм, кг	1,5
Нагрузка для плеча $L_5 = 845$ мм, кг	1,4
Нагрузка для плеча $L_6 = 910$ мм, кг	1,3
Нагрузка для плеча $L_7 = 975$ мм, кг	1,2

Эквивалентными материалами были песок, солидол, парафин, тальк, алебастр, цемент. Это позволило обеспечить равенство углов внутреннего трения материалов модели и природы.

Испытание материалов на прочность производилось путем раздавливания кубиков со стороной 4 и 7 см. На основании испытаний кубиков на прочность подбиралось такое соотношение компонентов, при котором эквивалентный материал имел прочность, рассчитанную по формулам (5-10).

Физико-механические свойства горных пород и эквивалентных материалов приведены в табл. 2.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ОТРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ МОДЕЛЕЙ ИЗ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Моделирование выполнено на плоском стенде с передней прозрачной стенкой. Размеры модели: длина – 140 см, высота – 125 см и ширина – 24 см.

Для моделирования отработки залежи приняты усредненные параметры залежи вмещающих пород (представительный геологический разрез для условий залегающего рудного тела в устойчивых породах):

- мощность залежи – 50 м;
- угол падения залежи – 75°;
- угол наклона днища камеры висячего бока – 55°;
- высота камеры – 200 м;
- висячий бок представлен устойчивыми породами (кварциты);
- лежащий бок представлен сланцевыми породами.

Для исследования устойчивости конструктивных элементов систем разработки на модели был принят геометрический масштаб моделирования 1:500, лучше удовлетворяющий соблюдению граничных условий. Во исполнение третьей теоремы Кирпичева соблюдены геометрическое подобие и последовательность ведения очистных и закладочных работ в упруго-вязкопластических средах.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД И ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Таблица 2

Наименование горных пород	Физико-механические свойства горных пород природы			Физико-механические свойства эквивалентных материалов			
	Коэффициент крепости	Угол внутреннего трения, градус	Предел прочности одноосному сжатию, МПа	Объемный вес, т/м ³	Угол внутреннего трения, градус	Сцепление, МПа	Предел прочности одноосному сжатию, МПа
Железистые кварциты	8-12	35	100	2,0	25	0,3	0,23
Сланцы кварц-хлорит-серицитовые	6-9	29	55	2,0	26	0,5	0,55
Руда гематит-маргитовая	5-7	23	30	2,0	22	0,03	0,05
Сланцы серицит-хлоритовые оталькованные	4-6	25	30	2,0	15	0,01	0,03
Шлакопесчаная закладка	До 3	25	2-3	2,0	21	0,03	0,03

Наименование горных пород	Эквивалентные материалы, соотношение компонентов, % по весу					
	Песок	Цемент	Солидол	Парафин	Тальк	алебастр
Железистые кварциты	96	-	-	-	-	4
Сланцы кварц-хлорит-серицитовые	95	5	-	-	-	-
Руда гематит-маритовая	96	-	3	1	-	-
Сланцы серицит-хлоритовые оталькованные	-	-	-	-	100	-
Шлакопесчаная закладка	97	-	3	-	-	-

Третья теорема подобия устанавливает следующие правила физического моделирования: оригинал и модель должны быть геометрически подобны; процессы в модели и оригинале должны относиться к одному классу и описываться одинаковыми дифференциальными уравнениями; начальные и граничные условия для модели и оригинала должны быть подобны; определяющие безразмерные критерии должны быть равны для модели и оригинала [1, 3]. В качестве эквивалентных материалов модели использованы смеси с различным соотношением песка, солидола, парафина, талька, алебаstra, цемента, миканита. [1, 2, 3, 4]. Это позволило обеспечить равенство углов внутреннего трения материалов и подобие процессов деформаций и разрушения модели и природы.

Так как моделировались условия отработки залежи до глубины 840 м, то в соответствии с принятым масштабом (1:500) высота модели должна быть 168 см. Недостающая часть гравитационной нагрузки компенсирована внешней пригрузкой согласно расчетам, приведенным в табл. 1. После приложения нагрузки модель была выдержана до стабилизации смещений.

Для контроля деформаций геометрических параметров камеры пользовались индикаторными линейками (рис. 3).

Испытание модели по отработке меж-

дукамерного целика высотой в два этажа в отметках 640-840 м велась в следующем порядке:

1. Формирование модели. Отработка рудной залежи системами с твердеющей закладкой по схемам от «камера – шесть целиков» до «камера – целик». Отработка рудной залежи верхнего подэтажа до контакта рудного тела с закладкой.

2. Закладка выработанного пространства верхнего подэтажа.

3. Отработка рудной залежи среднего подэтажа до контакта рудного тела с закладкой.

4. Закладка выработанного пространства среднего подэтажа.

5. Отработка рудной залежи нижнего подэтажа до контакта рудного тела с закладкой.

6. Закладка выработанного пространства верхнего подэтажа.

7. Отработка рудной залежи между двумя заложёнными камерами в этаже 640-840 м на всю высоту камеры (два этажа) до контакта рудного тела с закладкой.

Деформации и смещения в прилегающем к отработанному пространству массиве при отработке залежи в три стадии (от верхнего подэтажа к нижнему), так и при отработке в одну стадию (с высотой камеры в два этажа), индикаторными линейками зафиксированы не были (рис. 4).

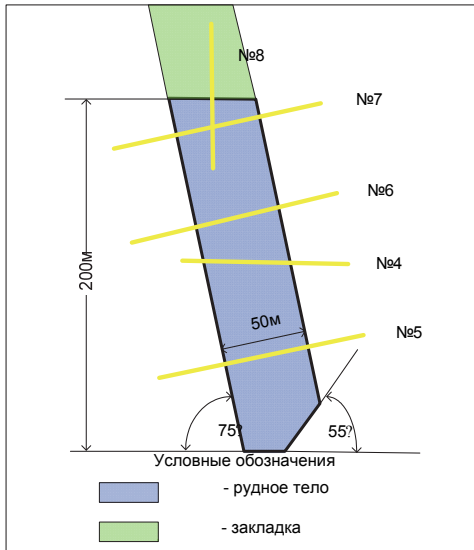


Рис. 3. Схема расстановки индикаторных линеек и/л №№ 4, 5, 6, 7, 8 на модели, имитирующей отработку камеры высотой 200 м, мощность залежи 50 м

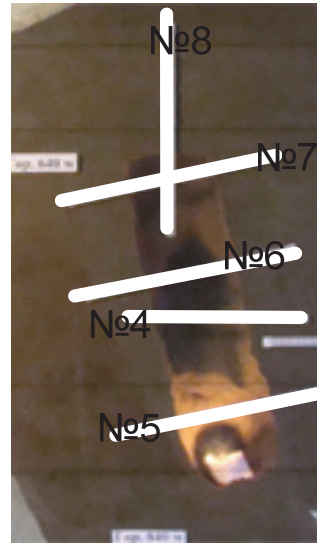


Рис. 4. Вид модели после отработки на всю высоту междукамерного целика высотой в два этажа между заложными камерами в отметках 640-840 м до контакта рудного тела с закладкой

ВЫВОДЫ

Моделированием методом эквивалентных материалов с соблюдением геометрического, силового и механического подобиya установлено:

- заложённый твердеющими смесями искусственный массив в трехмесячном возрасте не претерпевает напряжений, превышающих нормативную прочность, и сохраняет устойчивость. Случаи потери устойчивости обусловлены размером подсечки слабых пород висячего бока;

- зональность по устойчивости висячего бока, обуславливает необходимость дифференцированного подхода в установлении порядка отработки и геометриче-

ских параметров камер. В северном крыле, где при применяемых параметрах и формах камер висячий бок не обрушается, порядок отработки камер не лимитируются. Возможен вариант отработки залежи камерами высотой 200 м. В южном крыле рекомендуется по возможности отработку начинать сначала в средней части, затем у лежащего бока и в последнюю очередь у висячего. Отработку у висячего бока рекомендуется выполнять камерами уменьшенной ширины (10 или 15 м в зависимости от устойчивости висячего бока). Возможен вариант отработки с оставлением рудного треугольника в висячем боку.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, Г.Н. Моделирование проявлений горного давления [Текст] / Г.Н. Кузнецов, М.Н. Будько, Ю.Н. Васильев, М.Ф. Шклярский, Г.Г. Юревич. – Л: Недра, 1968. – 280 с.

2. Козина, А.М. Методическое руководство по подбору и испытанию эквивалентных материалов для моделирования [Текст] / А.М. Козина, Е.П. Рутковская. – М: ИГД им. Скочинского, 1973. – 23 с.

3. Козина, А.М. Методическое руководство по формовке и отработке крупномасштабных моделей из эквивалентных материалов [Текст] / А.М. Козина. – М: ИГД им. Скочинского, 1975. – 35 с.

4. Методические указания по исследованию проявлений горного давления на моделях из эквивалентных материалов. – Л: ВНИМИ, 1976. – 37с.

ОБ АВТОРАХ

Русских Владислав Васильевич – к.т.н., доцент кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Зубко Сергей Андреевич – начальник участка горно-проходческих работ № 4 шахты «Эксплуатационная» ЗАО «Запорожский железорудный комбинат».

Карапа Игорь Андреевич – начальник технического отдела ЗАО «Запорожский железорудный комбинат».

Яворский Андрей Васильевич – к.т.н., доцент кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.