

Д-р техн. наук, проф., А.М. Кузьменко,
канд. техн. наук, доц. Н.П. Уланова,
канд. техн. наук, доц. В.В. Приходько,
(Национальный горный университет)

инж., Директор шахты «Эксплуатационная» ЗАО ЗЖРК В.Ю. Усатый,
инж., ИГТМ НАН Украины В.В. Усатый

УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКИХ ВТОРИЧНЫХ КАМЕР В ОКРУЖЕНИИ РАЗНОМОДУЛЬНОГО МАССИВА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Розглядається стійкість високих вторинних камер зі складною стелею, що знаходяться в оточенні рудного та закладного масивів в складних природних умовах Південно-Білозірського родовища

STABILITY OF HIGH SECONDARY ROOMS WITH COMPLICATED CEILING, WHICH IS LOCATED IN AN ENVIRONMENT OF SERIES OF MASSIFS IN MINING OF ORE DEPOSITS

Stability of high secondary rooms with complicated ceiling, which is located in an environment of ore and backfilling massifs at a difficult natural condition of Southern-Bilozirsk basin, is considered

Запорожский железорудный комбинат осуществляет разработку Южно-Белозерского месторождения, которое характеризуется наличием природно-богатых железных руд. За период эксплуатации комбинатом месторождения применяемая этажно-камерная система разработки с отбойкой руды из подэтажных выработок с последующей закладкой выработанного пространства твердеющими смесями претерпела изменения.

Для сохранения показателей извлечения руды (потери – 8%, засорение – 1,26%), а также снижения трудоемкости подготовки днищ и повышения эффективности системы разработки была внедрена технология подготовки к отработке запасов сдвоенных этажей 480-640 м камерами шестиугольной формы сечения, высотой 92-100 м 30 м и шириной. В основу этой технологии положена раздельная отработка запасов в этажах 480-548 м, 548-640 м и подэтаже 465-518 м ромбовидными камерами при камерно-целиковой схеме их выемки в три стадии по высоте. Отработка ведется в две очереди. Отработка первичных камер третьей очереди в подэтаже 465-518 м производится с перепуском руды по рудоперепускным восстающим лежачего бока. Вторичные камеры предполагалось обрабатывать с организацией горизонта выпуска и доставки на отметке 510 м, связав его уклонами с горизонтом 518 м. В дальнейшем эта технология была принята к отработке всего шахтного поля в этаже 480-640м. Потолочина вторичных камер имела зубчатую форму, повторяя днище камеры вышележащего горизонта. Эти камеры обрабатываются после того, как закладка в камерах первой очереди наберет необходимую прочность к обнажению и устойчивость к сейсмическому воздействию. Для этой формы камеры необходимо было решить задачу по установлению напряженно-деформированного состояния

подработанного массива, как исходной информации, на основании которых принимается способ и порядок отбойки руды для обеспечения ее полноты извлечения и снижения засорения закладочным массивом.

В решаемой задаче рассматривался разномодульный массив, вмещающий выработку в форме камеры. Выработки вышележащего горизонта и окружающие камеру с боков считались отработанными и заполненными твердеющей закладкой, которая набрала достаточные прочностные свойства, при которых можно приступать к отбойке руды во вторичной камере (см. рис. 1).

Задача решалась методом граничных элементов в форме фиктивных нагрузок [1]. Вокруг камер разномодульный массив моделировался двумя подобластями R_1 и R_2 с различными физико-механическими характеристиками. Для этих подобластей рассматривались отдельные краевые задачи, которые потом связывались условиями непрерывности на поверхности контакта в виде равенства касательных и нормальных напряжений

$$\sigma_s^{[1]} = \sigma_s^{[2]}, \quad \sigma_n^{[1]} = \sigma_n^{[2]}$$

или касательных и нормальных смещений

$$u_s^{[1]} = -u_s^{[2]}, \quad u_n^{[1]} = -u_n^{[2]} .$$

Граничные условия на свободной поверхности выработки задавались в виде $(\sigma_n)_0 = 0$, $(\sigma_s)_0 = 0$.

Задача решалась в рамках линейной теории упругости с использованием принципа суперпозиции.

Границы областей разбивались на $N = N_1 + N_2$ элементов, из которых N_1 принадлежали контуру C_1 области R_1 , а N_2 – контуру C_2 области R_2 .

Напряжения и перемещения в каждой i -той точке границы подобласти находились в виде суммарного воздействия фиктивных нагрузок P_s и P_n во всех элементах соответствующей границы.

Полученная система $2N$ уравнений с $2N$ неизвестными компонентами фиктивных нагрузок имела вид

$$\left. \begin{aligned} b_s^i &= \sum_{j=1}^N C_{ss}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{sn}^{ij} P_n^j \\ b_n^i &= \sum_{j=1}^N C_{ns}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{nn}^{ij} P_n^j \end{aligned} \right\} i = \overline{1, N} . \quad (1)$$

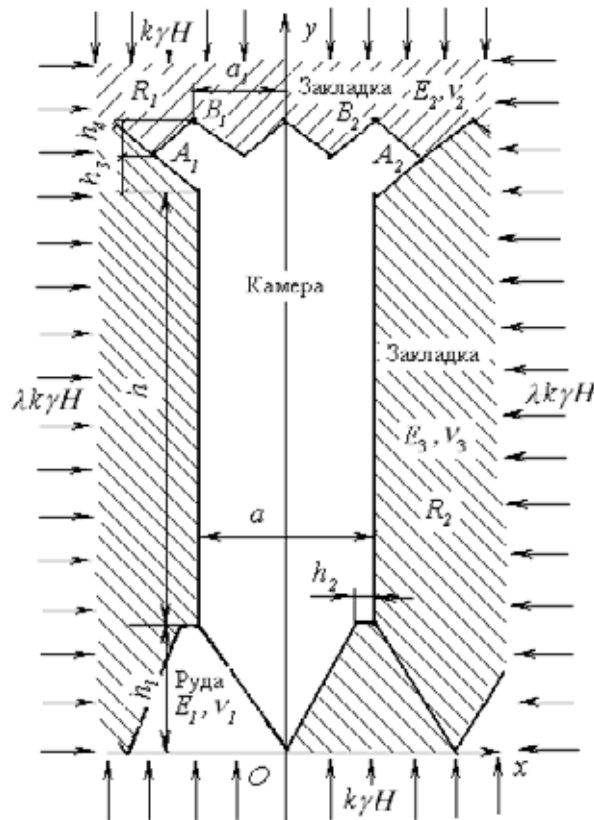


Рис. 1 – Расчетная схема к определению устойчивости высоких вторичных камер

Левые части уравнений системы (1) представляли собой действительные напряжения σ_s^i , σ_n^i или перемещения u_s^i , u_n^i в средней точке каждого отрезка границы. Первые N_1 компонент P_s^j и P_n^j - это фиктивные нагрузки $P_s^{[1]}$ и $P_n^{[1]}$, приложенные на N_1 элементах контура C_1 области R_1 , последующие N_2 компонент представляли фиктивные нагрузки $P_s^{[2]}$ и $P_n^{[2]}$, приложенные на N_2 элементах контура C_2 . Величины $C_{ss}^{ij}, \dots, C_{nn}^{ij}$ - граничные коэффициенты влияния. В случае напряжений коэффициент C_{sn}^{ij} (в дальнейшем A_{sn}^{ij}) дает касательное напряжение в i -том элементе, вызванное постоянной единичной нормальной нагрузкой, приложенной в j -ом отрезке ($P_n^j = 1$) границы. В случае перемещений C_{sn}^{ij} (обозначим этот коэффициент B_{sn}^{ij}) представляет собой смещение i -го элемента границы в направлении касательной s , вызванное единичным усилием P_n^j , приложенным в j -ом отрезке границы в направлении нормали к нему. Аналогичный смысл имеют остальные коэффициенты влияния.

Левые части системы (1), коэффициенты b_s^i и b_n^i , определялись следующим образом. Если i -й граничный элемент лежал, например, на свободной части контура C_1 , то

$$b_s^i = \sigma_s^{i[1]} = (\sigma_s^i)_0 = 0, \quad b_n^i = \sigma_n^{i[1]} = (\sigma_n^i)_0 = 0,$$

при этом

$$C_{sn}^{ij} = \begin{cases} A_{sn}^{ij[1]}, & j \leq N_1, \\ 0, & N_1 + 1 \leq j \leq N. \end{cases}$$

Аналогично определялись коэффициенты $C_{ss}^{ij}, C_{ns}^{ij}, C_{nn}^{ij}$. Если i -й элемент лежал на поверхности контакта двух подобластей, то для первой подобласти условия непрерывности записывались в напряжениях

$$b_s^i = \sigma_s^{i[1]} - \sigma_s^{i*[2]} = 0, \quad b_n^i = \sigma_n^{i[1]} - \sigma_n^{i*[2]} = 0,$$

$$C_{sn}^{ij} = \begin{cases} A_{sn}^{ij[1]}, & j \leq N_1, \\ -A_{sn}^{i*j[2]}, & N_1 + 1 \leq j \leq N, \end{cases}$$

а для второй подобласти – для перемещений

$$b_s^i = u_s^{i[2]} + u_s^{i*[1]} = 0, \quad b_n^i = u_n^{i[2]} + u_n^{i*[1]} = 0,$$

$$C_{sn}^{ij} = \begin{cases} B_{sn}^{i*j[1]}, & j \leq N_1, \\ B_{sn}^{ij[2]}, & N_1 + 1 \leq j \leq N. \end{cases}$$

Здесь i^* – элемент второй подобласти, парный элементу i . Другие коэффициенты вычислялись аналогично. Система уравнений (1) решалась методом исключения Гаусса.

Описанный алгоритм определения напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг выработки реализован в виде программы, составленной на языке ФОРТРАН.

Геометрические параметры камеры принимались равными: $h = 100$ м, $h_1 = 32$ м, $h_2 = 7$ м, $h_3 = 7$ м, $h_4 = 8$ м, $a = 30$ м и $a_1 = 15$ м. Модуль упругости руды $E_1 = 0,99 \cdot 10^5$ МПа, предел прочности на сжатие $\sigma_c = 45$ МПа, предел прочности на растяжение $\sigma_p = 0,1\sigma_c$, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,15$, объемная масса $\gamma = 1,9$ т/м³.

Физико-механические характеристики закладочного материала вышележащего горизонта: $E_2 = 0,99 \cdot 10^4$ МПа, $(\sigma_c)_2 = 7$ МПа. Коэффициент Пуассона равнялся $\nu_2 = 0,15$. Рассматривалось напряженно-деформированное состояние камер третьего этажа. Модуль упругости E_3 и коэффициент Пуассона ν_3 закладки камер, находящихся с боков выработки, принимались равными соответствующим характеристикам руды ($E_3 = E_1, \nu_3 = \nu_1$). Уменьшение нагрузки за счет расположенного в кровле мощного слоя железистого кварцита учитыва-

лось введением в расчет коэффициента $k=0,25$, определяемого опытным путем. Действующая нагрузка принималась равной $(\sigma_{yy})_0 = -k\gamma H = -3,7$ МПа; $(\sigma_{xx})_0 = -\lambda k\gamma H = -1,85$ МПа, что соответствует глубине разработки 775м и коэффициенту бокового распора $\lambda = 0,5$.

Контур выработки и граница раздела сред с различными физико-механическими характеристиками аппроксимировались 265 элементами.

Для оценки устойчивости использовался критерий типа Кулона-Мора, согласно которому “эквивалентные” напряжения $\sigma_{\text{экв.}}$ на контуре выработки не должны превышать предельно допустимые, определяемые по критерию [2]

$$\max \sigma_{\text{экв.}} = \frac{1}{2\psi} \left\{ \sqrt{(1-\psi)^2 (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 + 4\psi [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\tau_{xy}^2]} - (1-\psi)(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \right\} \leq \sigma_c,$$

где $\psi = \sigma_p / \sigma_c$.

Расчеты показали, что для глубины разработки $H = 775$ м выработка находится в упругом состоянии. Наибольшая концентрация “эквивалентных” напряжений наблюдается в кровле на участках A_1B_1 и A_2B_2 $\left(\frac{\max \sigma_{\hat{y}\hat{e}\hat{a}}}{(\sigma_c)_2} = 0,71 \right)$. По

вертикали эти напряжения быстро затухают и на расстоянии 5м от контура $\frac{\max \sigma_{\hat{y}\hat{e}\hat{a}}}{(\sigma_c)_2}$ уменьшается до 0,43. В центре кровли это отношение равняется 0,33.

В боках выработки и на нижнем уступе концентрация напряжений на контуре не превышает 0,51. В почве выработки породный массив находится в упругом состоянии, что является благоприятным для отработки последующих этажей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. - М.: Мир, 1987. - 328с.
2. Парчевский Л.Я., Шашенко А.Н. О величине внутреннего трения в задачах предельного состояния. - В кн. : Горное давление в капитальных и подготовительных выработках. - Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1981, с. 32-35.