Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXI, вып. 1, 1972 г.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАГРУЗОК НА ИСКУССТВЕННЫЕ ЦЕЛИКИ

А. А. Борисов, С. Н. Суглобов

Камерные системы разработки с твердеющей закладкой получают все большее распространение. Это вызывает необходимость дальнейшего развития расчетных методов определения основных параметров систем и прочностных свойств закладки. Цель таких расчетов — обоснованный выбор ширины междукамерных целиков, пролетов камер, ширины панели или блока, размеров междублоковых (панельных) целиков, определение необходимой прочности искусственных целиков. Результаты расчетов, естественно, будут различны в зависимости от порядка отработки участков (блоков), камер в пределах одного блока, структуры и свойств закладочного массива и других условий.

Характер распределения и величина нагрузок на искусственные целики изучены недостаточно. Лабораторные и натурные исследования находятся в начальной стадии. Аналитические методы определения давлений на искусственные целики являются, как правило, перенесением известных методов, которые разработаны для рудных и угольных междукамерных целиков. Однако прочностные и деформационные свойства закладочного материала, начальное напряженное состояние искусственных целиков и характер их взаимодействия с вмещающими породами в процессе развития очистных работ имеют принципиальное отличие от целиков, сложенных полезным ископаемым, и, следовательно, требуют нового подхода к выбору расчетного метода.

Существующие методы расчета параметров твердеющей закладки исходят из двух предположений.

1. Суммарная нагрузка на целики определяется весом пород до поверхности и остается постоянной на всех стадиях выемки камер в блоке. Нагрузки на рудные и искусственные целики в блоке распределяются в соответствии с их суммарной площадью на каждой стадии выемки и деформационными свойствами руды и закладки. При этом допускается, что деформация всех целиков в блоке одинакова на каждой отдельной стадии отработки [4].

В подобных расчетах предлагается выбирать параметры целиков и закладки, исходя из наибольших возможных нагрузок. Условия передачи на искусственные целики полного веса пород до поверхности могут возникнуть при наличии слабых или сильнотрещиноватых пород либо при значительных пролетах отработки (соизмеримых с глубиной работ). Во многих случаях рудные залежи распространяются локально

в относительно крепких породах. Для подобных условий расчет на давление полного веса пород до поверхности может привести к необоснованному завышению размеров целиков и прочности закладки. Область сдвижения пород, определяющую нагрузки на целики, можно значительно уменьшить за счет возведения прочных панельных искусственных целиков, которые способны воспринимать большие давления, и благодаря этому закладочный материал для искусственных внутрипанельных целиков может быть менее прочным.

2. Нагрузка на искусственные целики в пределах пролета панели, участка, блока определяется весом налегающей толщи до породы-моста или до некоторого слоя, сохраняющего устойчивость при раздавливании целиков; вес оставшейся части пород воспринимается оставляемыми панельными (междублоковыми) целиками [1—3].

Представление о возможности разгрузки междукамерных целиков за счет барьерных можно считать вполне обоснованным при рассмотрении искусственных целиков, что подтверждается также испытаниями моделей из эквивалентных материалов.

Высокая деформационная способность твердеющей закладки, наличие пластичных глинистых прослойков и неполнота подбутовки закладкой кровли камер способствуют значительным перемещениям пород кровли над целиками. Перераспределение напряжений в покрывающей толще носит более выраженный характер.

Характер взаимодействия целиков с вмещающими породами во многом зависит от порядка отработки камер. Наибольшее распространение в практике разработки с твердеющей закладкой получили схемы с разделением залежи на отдельные блоки, состоящие из нескольких камер (рис. 1, *а, б*), и с последовательной выемкой камер и междукамерных целиков при развитии работ в одном направлении (рис. 1, *в*).

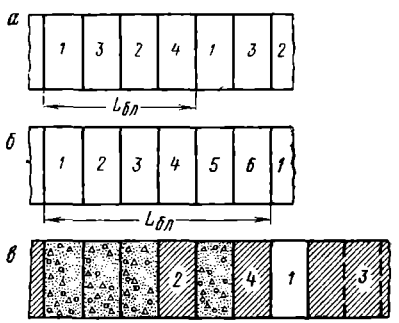


Рис. 1. Некоторые варианты порядка отработки камер: *а* — блоковый четырехстадийный; *б* — блоковый сплошной; *в*—последовательный

Цифрами значен порядок выемки камер

Порядок отработки камер в отдельном блоке может быть различным. Чаще всего встречаются варианты с выемкой камер через одну или две. Имеются схемы со сплошной выемкой без оставления целиков. При последовательной выемке камер первой и второй очереди работы могут развиваться также одновременно в нескольких блоках, разделяемых междублоковыми целиками.

Во всех схемах отработки камер (за исключением сплошной) закладка вторичных камер с точки зрения извлечения запасов, вообще говоря, необязательна. Необходимость заполнения вторичных камер во многих случаях вызывается целым рядом различных обстоятельств: для более надежного поддержания вышележащих пород при подработке карьеров, водоемов и сооружений, для обеспечения безопасности работ на нижнем горизонте, для увеличения несущей способности искусственных целиков, возводимых в камерах первой очереди, за счет создания больших закладочных массивов и др. В большинстве случаев вторичные камеры закладываются инертным материалом, не обладающим несущей способностью. При этом могут закладываться или все вторич-

ные камеры (полная закладка), или с пропуском через одну, две более (рис. 2) Роль сухой закладки во вторичных камерах практически сводится к некоторому увеличению прочности искусственных целиков из твердеющей закладки.

Проведенные нами исследования на моделях по раздавливанию составных целиков в условиях двухосного сжатия с соотношением $b/h_0=0{,}5$ при различных схемах заполнения вторичных камер показали, что несущая способность комбинированного целика повышается относительно соответственных целиков без закладки вторичных камер в зависимости от количества заложенных вторичных камер. Так, если несущую способность целиков, представленных на схеме *а* (см. рис. 2) принять за единицу, то несущая способность комбинированного целика увеличится соответственно для схем *б* в 1,15—1,25, *в* — в 1,35—1,50; *г* — в 1,50—1,80 раз. Таким образом, при одной и той же прочности твердеющей закладки посредством заполнения вторичных камер можно увеличить несущую способность закладочного массива. Количественно такое увеличение можно учесть, вводя усредненный коэффициент 1,0; 1,2; 1,4; 1,6 соответственно схемам *а, б, в,*

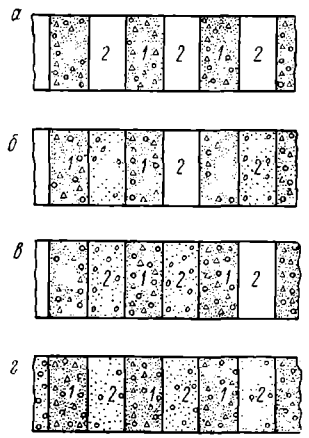


Рис. 2. Схемы закладки вторичных камер

ющая
сухая

Характер распределения и динамики нагружения искусственных целиков для последовательной схемы отработки камер исследовался на плоских моделях из эквивалентных материалов, что допустимо при отношении длины блока к его ширине более двух. Схема моделей и характер распределения нагрузок в долях γH на одной из стадий выемки показаны на рис. 3. Модели испытывались для условий различной прочности закладки и количества рудных междукамерных целиков в зоне отработки без заполнения вторичных камер.

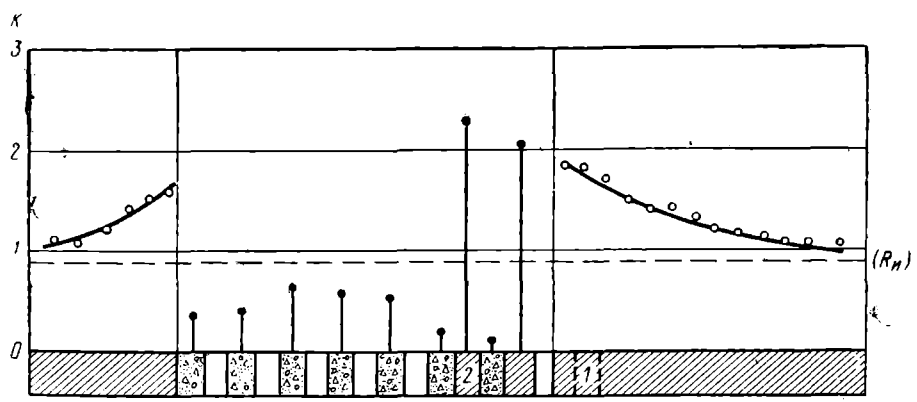


Рис. 3. Распределение нагрузок на целики при последовательной отработке камер в моделях из эквивалентных материалов

ственно первичных вторичных камер. Линией $(R_н)$
наибольшая реакция искусственного целика

Как показали опыты, нагрузки на искусственные целики в выработанном пространстве распределены неравномерно. Наибольшие нагрузки испытывают целики, расположенные вблизи середины пролета отработки, т. е. пролета, представляющего сумму пролетов всех вторичных камер и ширины всех искусственных целиков. Рудные междукамерные целики также нагружены неравномерно, и, как правило, нагрузки на них тем больше, чем ближе целик к выработанному пространству.

Искусственные целики воспринимают только часть нагрузок от веса вышележащих пород, в то время как концентрация напряжений в рудных целиках и граничном массиве может достигать больших значений. Нагрузки на искусственные целики с увеличением пролета отработки возрастают до уровня несущей способности центрального в этом пролете целика. Разрушение центрального целика вызывает цепную реакцию разрушений остальных искусственных целиков и пород кровли в данном пролете.

Исследования на моделях позволили установить, что при прочих равных условиях существует связь между прочностью закладки и длиной пролета отработки. Характер распределения и величины нагрузок на целики, а также форма обрушения слоистой кровли явились основанием для принятия основной расчетной схемы (рис. 4). Цель

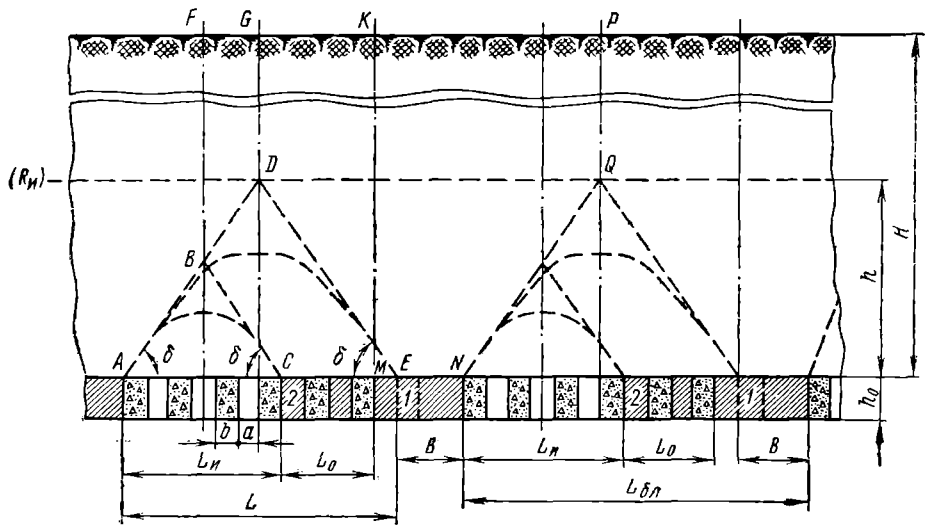


Рис. 4. Схема к расчету давлений на целики
1 и *2* — то же, что 3

расчета — установить соответствие основных параметров системы разработки с прочностью искусственных целиков. Для последовательной схемы (см. рис. 1, *в*) определяются соотношения между прочностью твердеющей закладки, шириной пролета отработки (шириной панели) в зависимости от конструкции закладочного массива в выработанном пространстве, необходимой прочностью и размерами панельного (междублокового) целика, устанавливается рациональная область возведения искусственного междублокового целика. Кроме того, расчет предусматривает проверку прочности рудных междукамерных целиков в процессе отработки панели.

Основные предпосылки к расчету следующие.

1. Нагрузки на искусственные целики рассчитываются на момент их раздавливания, когда выделяется наибольшая область пород, передающих свой вес на целики.

2. Нагрузка на искусственные целики в процессе отработки и оформления панели определяется весом пород, заключенных в зоне обрушения. Для угольных месторождений, характеризующихся слоистой структурой пород, эта зона ограничена линиями, наклоненными к горизонту под углом δ. Распространение обрушения развивается до устойчивого пролета некоторого слоя, величина которого подсчитывается по известным формулам. В крепких трещиноватых породах рудных месторождений обрушение кровли имеет, как правило, форму свода. В приближенных расчетах нагрузку на искусственные целики можно определять в соответствии с весом пород, заключенных в треугольнике с углами в основании, равными углу обрушения пород δ. Превышение расчетных нагрузок идет в запас прочности искусственных целиков.

Для слоистых структур, в которых можно выделить породу-мост, нагрузка на искусственные целики принимается в соответствии с весом пород до породы-моста, если ее прогибы меньше деформаций искусственных целиков. Если возводятся внутрипанельные (внутриблоковые) целики из твердеющей закладки, это условие выполняется чаще, нежели при работе с рудными или угольными целиками, поскольку суммарные деформации у целиков из твердеющей закладки значительно больше по их абсолютным величинам: искусственные внутриблоковые целики не всегда плотно возведены под самую кровлю (часто остаются пустоты) и включаются в работу уже после того, как кровля и породы покрывающей толщи частично деформировались.

3. Несущая способность искусственных целиков в зависимости от конструкции закладочного массива определяется в соответствии с приведенными усредненными коэффициентами.

4. Ширина камер первой и второй очереди принимается одинаковой по условиям устойчивости пород кровли незакрепленной камеры и технологичности выемки. Панельный искусственный целик образуется за счет заполнения группы соседних камер закладкой повышенной прочности, т. е. его ширина кратна ширине камеры.

Искусственные целики могут воспринять нагрузку пород, заключенных в зоне обрушения ADE, соответствующую их несущей способности, условно показанной линией ($R_и$) на рис. 4. Тогда наибольший пролет отработки L при заданной прочности закладки определится или из треугольника ADE:

$$L = 2h \operatorname{ctg} \delta, \tag{1}$$

или по числу камер в пролете:

$$L = (n+1)b + na, \tag{2}$$

где h — высота зоны обрушения; δ — угол обрушения, n — число камер второй очереди в пролете панели; a, b — соответственно ширина камер первой и второй очереди.

При $a = b$ формула (2) примет вид

$$L = (2n+1)b. \tag{2а}$$

Из формул (1) и (2) следует:

$$h = \frac{(2n+1)b}{2 \operatorname{ctg} \delta}. \tag{3}$$

Из треугольника ADE определяется суммарная нагрузка, передающаяся на искусственные целики,

$$P_{и}=\frac{1}{2}\gamma hL. \tag{4}$$

Средняя нагрузка на каждый целик

$$R_{и_{ср}}=\frac{P_{и}}{\Sigma b}=\frac{P_{и}}{(n+1)\,b} \tag{5}$$

Подставляя в выражение (5) значения h и $P_{и}$ из уравнений (3) и (4), получим

$$R_{и_{ср}}=\frac{\gamma L}{4\operatorname{ctg}\delta}\quad\frac{2n+1}{n+1} \tag{6}$$

Для упрощения расчета примем

$$\frac{2n+1}{n+1}\approx\frac{2n+2}{n+1}=2$$

Погрешность расчета в результате упрощения идет в запас прочности целиков и уменьшается с увеличением L.

Необходимая прочность закладки для всех искусственных целиков устанавливается в соответствии с наибольшей нагрузкой, воспринимаемой центральным в пролете целиком, величина которой составляет $2R_{и_{ср}}$ или

$$R_{и\,max}=\gamma L\operatorname{tg}\delta. \tag{7}$$

Расчетная прочность закладки принимается по значению $R_{и\,m}$ с учетом ряда факторов

$$R_{и\,max}=\frac{k\sigma_{и}}{n_{з}}, \tag{8}$$

$$k=k_1k_2k_3k_4, \tag{9}$$

где k_1, k_2, k_3 и k_4 — коэффициенты, учитывающие соответственно соотношение ширины и высоты целика, увеличение несущей способности целика за счет закладки вторичных камер, структурные ослабления целиков и наличие в них выработок, неполноту подбутовки закладкой кровли камер; $\sigma_{и}$ — предел прочности сжатию твердеющей закладки, $n_{з}$ — коэффициент запаса прочности (при работе с обрушением принимается $n_{з}=1$).

Общая нагрузка на междублоковый или панельный целик шириной B определится весом пород до поверхности в пределах блока, исключая часть породного массива, приходящегося на внутриблоковые целики (фигура $GDENQP$ на рис. 4)

$$R_{B}=\gamma\left[(L+B)H-\frac{1}{2}Lh\right] \tag{10}$$

Заменив h согласно выражению (1), получим

$$R_{B}=(L+B)\gamma H-\frac{1}{2}\gamma L\operatorname{tg}\delta\frac{L}{2}$$

Но так как

$$R_{и}=\frac{1}{2}\gamma L\operatorname{tg}\delta,$$

окончательно получаем для необходимой прочности междублокового целика выражение

$$R_B = \frac{k'\sigma_B}{n'_3} = \frac{1}{B}\left[(L+B)\gamma H - \frac{R_и}{2}L\right] \qquad (11)$$

Таким образом, предлагаемый расчет позволяет увязать параметры выемочной панели с величинами необходимой прочности закладки, исходя из наибольших нагрузок в условиях предельного состояния. Естественно, соотношения между $\sigma_и$, σ_B, L и B могут быть различными. Оптимальный вариант следует выбирать на основе технико-экономического анализа.

Возведение междублокового целика при достаточно высокой прочности внутриблоковых целиков не всегда целесообразно. Но область рационального применения междублоковых целиков может быть установлена для каждого отдельного случая.

В качестве примера на рис. 5 приводится номограмма соотношений L, $\sigma_и$, σ_B, рассчитанная для следующих условий: $H=300$ *м*; $\gamma_{ср}=2{,}8$ *т/м*^{3}; $b=a=8$ *м*; $B=24$ *м*; $h_0=10$ *м*; $\delta=70°$ Номограмма * рассчитана для всех схем, приведенных на рис. 2. Линии *1—4* определяют область рационального применения междублоковых целиков, за которой прочность внутриблоковых целиков становится выше междублоковых.

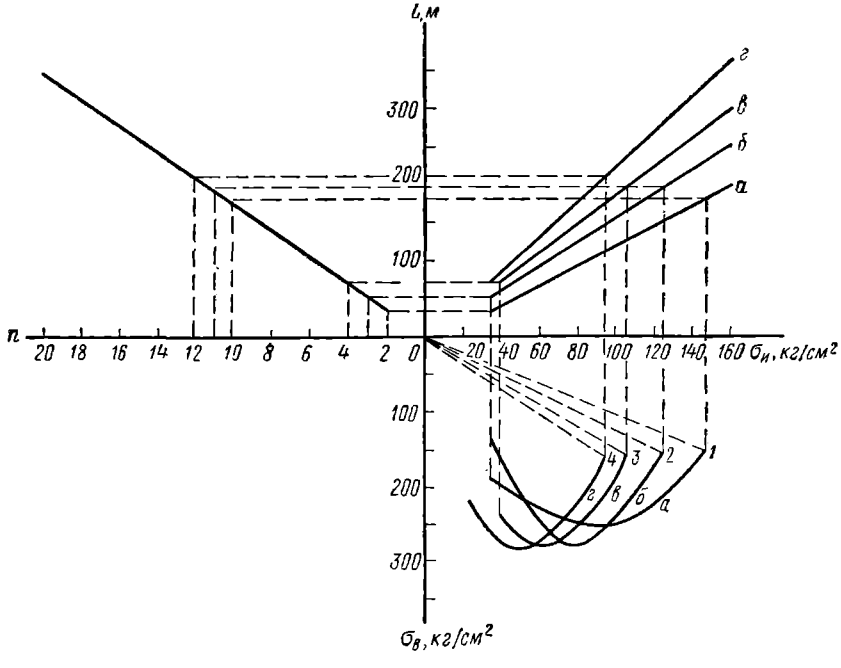


Рис. 5. Номограмма для определения параметров системы разработки

По мере увеличения пролета отработки $L_и$ возрастают нагрузки на рудные междукамерные целики, и может случиться, что они исчерпают несущую способность ранее достижения полной ширины блока.

* При расчете все коэффициенты в формулах (8), (9) и (11), кроме k_2, приняты равными единице.

В связи с этим необходимо проверять прочность междукамерных целиков при наибольшей величине пролета L. Будем считать, что на все междукамерные целики оказывает давление вес пород, заключенных в консоли $FBCMK$ (см. рис. 4), а нагрузка на них распределяется пропорционально, возрастая к выработанному пространству. Тогда, если в зоне отработки располагается m рудных целиков ($L_0=2mb$), то в предельном случае при оформлении междублокового целика общая нагрузка на них составит

$$P_{\text{р}}=\gamma H\left(L_0+\frac{L}{2}\right)-\frac{1}{4}\gamma hL,$$

или, согласно выражениям (1) и (6),

$$P_{\text{р}}=\gamma H\left(2mb+\frac{L}{2}\right)-\frac{R_{\text{ц ср}}}{4}L \qquad (12)$$

Нагрузка на крайний к выработанному пространству целик

$$R_{\text{р max}}=\frac{m}{\sum\limits_{1}^{m} m}P_{\text{р}}.$$

Условие прочности междукамерного целика определится из выражения

$$\frac{R_{\text{р max}}}{b}\leqslant|\sigma_{\text{р}}|,$$

или окончательно

$$|\sigma_{\text{р}}|\geqslant\frac{m}{\sum\limits_{1}^{m} m}\cdot\frac{1}{b}\left[\gamma H\left(2mb+\frac{L}{2}\right)-\frac{R_{\text{и}}}{4}L\right] \qquad (13)$$

Предлагаемый расчетный метод хорошо согласуется с результатами испытаний моделей из эквивалентных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольхин Б. А. и др. Обоснование параметров систем разработки с применением твердеющей закладки. «Горн. журн.», 1970, № 6.

2. Лысенко И. З., Жукович И. Е., Раденко Е. С. К определению основных параметров панельно-столбовой системы с искусственными податливыми опорами в условиях Джезказганских рудников. В сб. «Усовершенствование технологии добычи руд Казахстана». Тр. ИГД АН КазССР, т. 21, 1966.

3. Модестов Ю. А. Совместный расчет междукамерных и межблоковых (барьерных) целиков при разработке пластовых месторождений. В сб. «Методы определения размеров опорных целиков и потолочин». Изд. АН СССР, 1962.

4. Ушенин В. П. Определение нагрузок на рудные и искусственные целики при отработке пологих месторождений с бетонной и твердеющей закладкой. В сб. «Новые исследования в горном деле». Изд. ЛГИ, 1969.