Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,
т.ХXXII, 1980 г.

УДК 622.23Q.02.531:622.27

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРОВЛИ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ

Е.Д.КОЧЕТКОВ

Постоянное возрастание требований к полноте выемки полезных ископаемых, охране недр и окружающей среды ставит системы разработки с твердеющей закладкой в ряд наиболее перспективных. Обоснованный выбор параметров этих систем является важнейшей задачей и определяет эффективность их использования.

В настоящее время существует несколько направлений расчета параметров систем разработки с твердеющей закладкой. Подавляющее большинство расчетных методов посвящено определению нагрузок на искусственные и рудные целики, оценке их напряженно-деформированного состояния, определению необходимой прочности твердеющей закладки. Однако в практике разработки месторождений весьма часто встречаются задачи, связанные не только с определением нагрузок на целики, но и с необходимостью установления величины деформаций кровли. Такие вопросы возникают при изучении параметров подкарьерных целиков между открытыми и подземными работами, при оценке напряженно-деформированного состояния искусственной кровли из твердеющей закладки для слоевых систем разрабстки и др. Как правило, расчет напряженно-деформированного состояния кровли производится так же, как и оценка состояния целиков.

Традиционные методы расчета целиков и деформаций кровли основаны на решении задачи о деформировании упругого полупространства или полуплоскости с отверстиями, заполненными материалом со свойствами закладки, методами механики сплошной среды [,6] или решения балки (плиты) на упругом основании, характеристики которого отвечают свойствам искусственных и рудных целиков на исследуемой стадии отработки [I,2].

Общим в существующих расчетных методах является допущение о независимости конечного состояния системы кровля - целики от промежуточных состояний, соответствующих определенным стадиям отработки и закладки исследуемого участка горного массива. За исходное принимается состояние кровли, которое она занимала бы в нетронутом массиве, а за конечное - состояние кровли после завершения очистных и закладочных работ на исследуемой

стадии отработки. Такое допущение о независимости конечного состояния от промежуточных является вполне справедливым при расчете рудных целиков для систем с открытым очистным пространством, что подтверждается результатами лабораторных и натурных исследований. При расчетах систем с твердеющей закладкой традиционным способом оценка величины деформаций кровли представляет гораздо более сложную задачу.

Так, например, руководствуясь принятым допущением, даже не производя вычислений можно отметить следующее:

деформации кровли в сторону выработанного и заложенного пространства возможны только при применении закладки, деформационные свойства которой ниже, чем извлекаемого рудного массива;

деформации кровли будут отрицательными при замене извлекаемого полезного ископаемого закладкой, жесткость которой выше, чем жесткость руды; следовательно, кровля в этом случае будет не прогибаться в сторону выработанного пространства, а выпирать; напряжение в искусственных целиках могут оказаться выше, чем самих нагруженных рудных.

Все это противоречит действительности, и поэтому для оценки корректности принятого допущения необходимо детально проанализировать основные процессы, происходящие при разработке месторождений с закладкой.

Рассмотрим процессы деформирования кровли при последовательном извлечении рудного массива и замене его искусственным (рис.I).Для наглядности ограничимся описанием всего двух стадий разработки, ввиду идентичности процессов, происходящих на последующих стадиях.

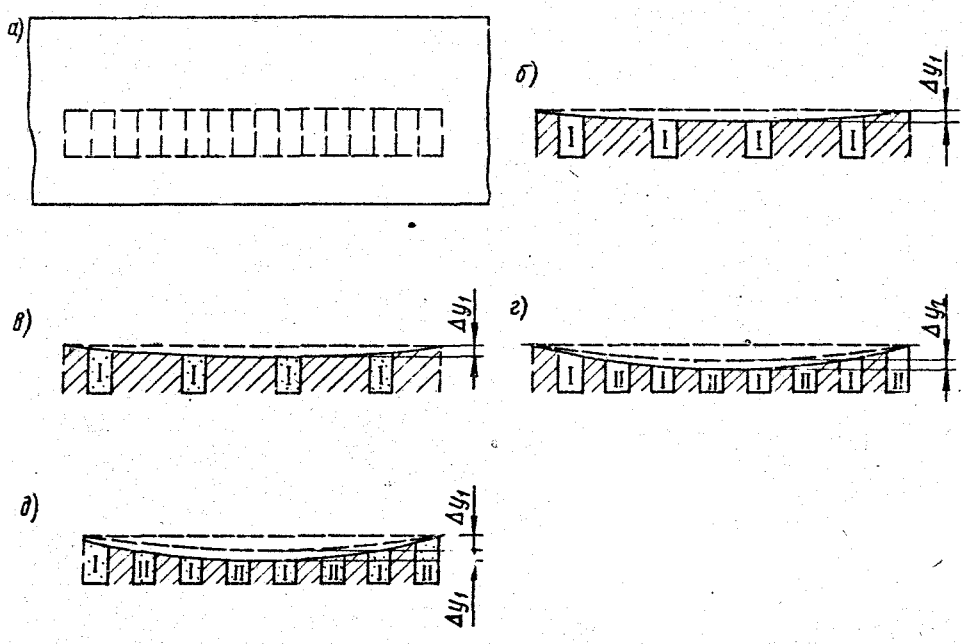


Рис.1. Основные стадии деформирования кровли при отработке с применением твердеющей закладки

За начальное положение кровли примем ее положение до начала ведения горных работ (рис.I.а). Отработка камер I очереди вызовет увеличение нагрузок на рудные целики, их деформацию и прогиб кровли на величину Δy_1 в сторону выработанного пространства камер I очереди (рис.I,б).

После завершения очистных работ в камерах их заполняют твердеющей смесью под уже деформированную на Δy_1 кровлю (рис.I,в). В этот момент закладка не воспринимает никаких нагрузок со стороны кровли. Деформации ползучести также не могут оказать заметного влияния на состояние только что возведенных искусственных целиков. Процесс твердения закладки продолжительный, а к моменту набора ею достаточной (необходимой) прочности, как правило, начинаются работы по выемке камер следующей очереди, поэтому возведенные целики до начала очистных работ следующей стадии будут испытывать лишь очень малые нагрузки, величиной которых можно пренебречь.

При отработке камер II очереди возрастут нагрузки на оставшиеся рудные целики и появятся нагрузки на искусственные целики (заложенные камеры I очереди). Деформации кровли возрастут, и она займет новое положение, которое будет зависеть от деформаций целиков и прогиба ее в выработанное пространство камер II очереди (рис.I,г). Закладка камер II очереди, так же как и на предыдущей стадии, будет производиться под кровлю, деформированную на величину $\Delta y_1 + \Delta y_2$, следовательно, и в этом случае вновь заложенные камеры не будут воспринимать нагрузок (рис.I,д).

Рассмотрев процесс деформирования системы кровля – целики, отметим следующие важные моменты. При разработке участка месторождения с закладкой процесс деформирования кровли можно представить как ряд переходов системы кровля – целики из одного квазистационарного состояния в другое. Причиной перехода является очистная выемка камер, а не замена жестких рудных целиков более податливыми искусственными.

Деформационные свойства закладки, соотношение между упругими характеристиками рудных и искусственных целиков и количество стадий отработки будут лишь определять величину прироста деформаций кровли на каждой стадии отработки. Чем более жесткой будет закладка и чем больше будет стадий отработки, тем меньшие деформации испытает кровля к моменту завершения отработки и закладки исследуемого участка. И наоборот, чем меньше стадий отработки и податливее закладочный материал, тем большие деформации испытает кровля.

Следовательно, конечное состояние системы кровля – целики будет определяться не только деформационными свойствами рудных и искусственных целиков, как следует из предположения о независимости конечного состояния от промежуточных, но и количеством стадий отработки. Деформации кровли в сторону выработанного пространства всегда будут иметь место, даже в случае применения очень жестких закладочных материалов.

Неучет опусканий кровли при выемке камер приводит к занижению конечной величины ее деформации, что вызовет заведомое занижение нагрузок на рудные целики и завышение их на искусственные. Если завышение нагрузок на закладку повысит запас прочности, то занижение нагрузок на рудные целики и действующих напряжений в кровле может привести к весьма

отрицательным последствиям, поэтому при расчете деформаций кровли обязательно должны учитываться процессы, происходящие на каждом этапе работ, особенно при небольшом количестве (две-три) стадий отработки.

Рассмотрим в качестве примера случай подработки слоя твердеющей закладки, являющегося искусственной кровлей, при разработке месторождений одним из вариантов системы горизонтальными слоями с закладкой в нисходящем порядке [5]. Определим величину деформаций кровли с учетом промежуточных состояний и без их учета (традиционным методом).

Искусственную кровлю можно представить в виде бетонной плиты, опирающейся длинными сторонами на прочные боковые породы и испытывающей распределенную нагрузку со стороны неустойчивых пород кровли (рис.2). Плита

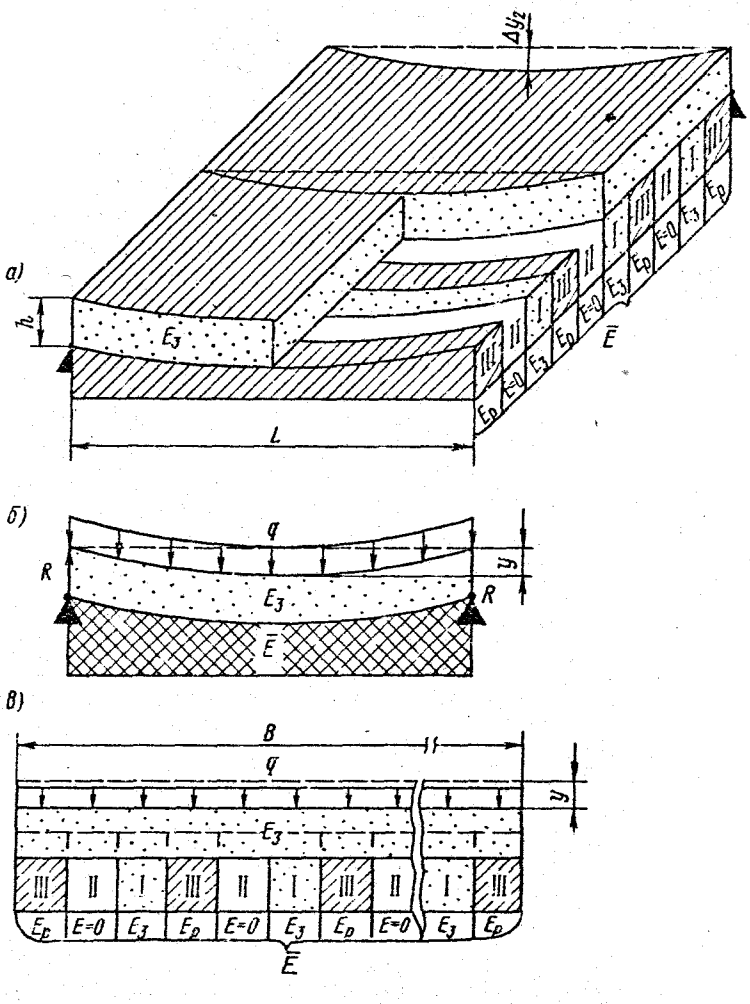


Рис.2. Схема деформирования искусственной кровли:
а – общий вид искусственной кровли в момент ее подработки; б – расчетная схема;
в – сечение системы кровля – целики по образующей

поддерживается комбинированной опорной системой, состоящей из заложенных заходок и участков нетронутого рудного массива.

Из теории плит известно, что деформации такой плиты по образующим будут практически одинаковы по всей ее длине, т.е. плита будет изгибаться только по короткой стороне и ее прогиб на каждой стадии будет определяться количеством заложенных, незаложенных и неотработанных заходок в рабочем слое. Величины деформаций рудных и искусственных целиков в рабочем слое будут практически одинаковы на любой стадии работ (рис.2,в). Для определения деформационных свойств системы рудных и искусственных целиков в данном случае будет правомерным использование понятия "приведенный" модуль деформации [4,7,8], характеризующего деформационные свойства рассматриваемой опорной системы:

$$\bar{E}_i = \frac{n_з E_з + n_р E_р}{n_з + n_р + n_0}, \qquad (1)$$

где $n_з$, $n_р$ и n_0 - количество соответственно заложенных, неотработанных и незаложенных заходок; $E_з$ и $E_р$ - модуль деформаций соответственно закладки и руды.

При одинаковом количестве заходок, отрабатываемых и закладываемых на одну стадию, на момент окончания отработки заходок i-й стадии

$$\bar{E}_i = \frac{1}{N}\left[E_р(N-i) + E_з(i-1)\right];$$

до начала отработки заходок i-й стадии

$$\bar{E}_{0_i} = \frac{1}{N}\left[E_р(N-i+1) + E_з(i-1)\right],$$

где N - количество стадий отработки; i - порядковый номер стадии отработки.

Для определения деформаций искусственной кровли, опирающейся на две опоры (боковые породы) и поддерживаемой комбинированной опорной системой, воспользуемся математическим аппаратом метода балок-плит на упругом основании [7]. Характер деформирования искусственной кровли позволяет рассматривать данную задачу как плоскую, поэтому выделим из плиты балку шириной единица и определим ее деформации.

Величина опускания кровли на конец отработки нижележащего слоя будет представлять сумму приростов деформаций, вызываемых отработкой очистных заходок на каждой i-й стадии (рис.3):

$$Y = \sum_{1}^{N} \Delta_i. \qquad (2)$$

Прирост деформаций в результате выемки заходок i-й стадии

$$\Delta_i = y_i - y_{0_i}. \qquad (3)$$

Максимальная величина деформаций в середине пролета

$$Y_{\left(x=\frac{L}{2}\right)} = \frac{5}{384}\frac{qL^4}{E_з I}\left(1 - \frac{\alpha}{155+\alpha}\right), \qquad (4)$$

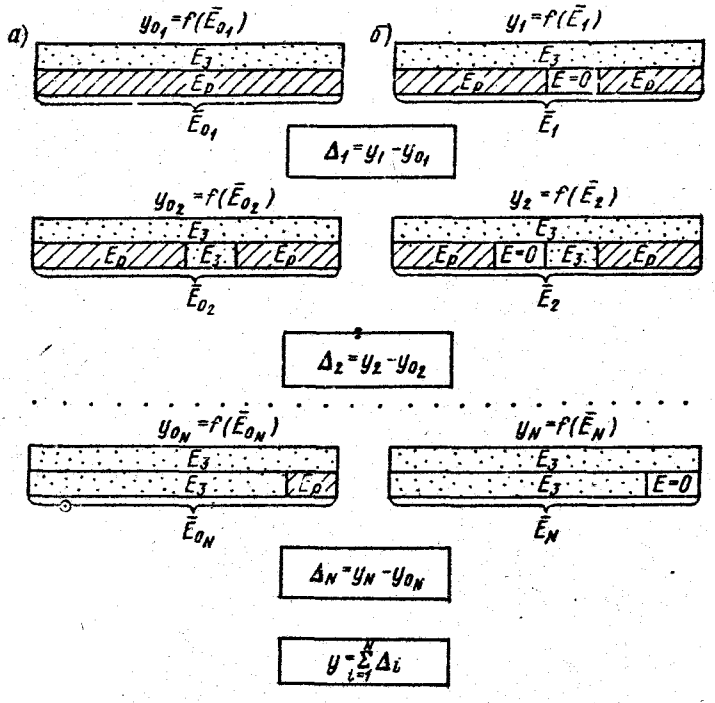


Рис.3. Состояние системы балка – основание: а – до начала очистных работ; б – после их окончания

тогда прирост деформаций за i-ю стадию

$$\Delta_i = y_i - y_{0_i} = \frac{5}{384}\frac{qL^4}{E_э I}\left(\frac{\alpha_{0_i}}{155+\alpha_{0_i}} - \frac{\alpha_i}{155+\alpha_i}\right), \qquad (5)$$

где q – величина распределенной нагрузки; α_{0_i} и α_i – показатель гибкости системы балка – основание соответственно перед отработкой и после отработки; I – момент инерции сечения балки;

$$\alpha_{0_i} = 12\pi\frac{E_{0_i}}{E_э}\left(\frac{L}{h}\right)^3;$$

$$\alpha_i = 12\pi\frac{E_i}{E_э}\left(\frac{L}{h}\right)^3; \qquad (6)$$

L/h – отношение ширины балки к ее высоте.

Величина деформаций на момент завершения работ

$$Y = \frac{5}{384}\frac{qL}{E_э I}\sum_{1}^{N}\left(\frac{\alpha_{0_i}}{155+\alpha_{0_i}} - \frac{\alpha_i}{155+\alpha_i}\right). \qquad (7)$$

Результаты расчета конечных деформаций искусственной кровли, выполненные по формуле (7) при значениях $k = E_p/E_э = 0{,}1 \div 10{,}0$; $L/h = 3 \div 5$; $N = 2;3;5$ представлены в таблице. Для сопоставления приведены

Значение деформаций искусственной кровли δ

k	Количество стадий N			δ'
	2	3	5	
		L/h= 3		
0,1	0,166	0,117	0,086	-0,47
0,2	0,202	0,145	0,110	-0,299
0,5	0,201	0,159	0,131	-0,100
1,0	0,202	0,161	0,138	0,000
2,0	0,202	0,163	0,142	0,063
5,0	0,212	0,167	0,147	0,104
10,0	0,220	0,174	0,150	0,117
		L/h= 5		
0,1	0,1543	0,0912	0,0581	-
0,2	0,1160	0,0705	0,0477	-
0,5	0,0738	0,0515	0,0404	-
1,0	0,0593	0,0451	0,0379	0,0000
2,0	0,0555	0,0429	0,0368	0,0055
5,0	0,0568	0,0432	0,0368	0,025
10,0	0,0585	0,0443	0,0374	0,029
		L/h= 10		
0,1	0,03690	0,01961	0,01112	-
0,2	0,02050	0,01164	0,00751	-
0,5	0,01062	0,00719	0,00556	-
0,00	0,00804	0,00603	0,00500	0,0000
2,0	0,00738	0,00555	0,00481	0,0
5,0	0,00751	0,00565	0,00478	0,0033
10,0	0,00774	0,00578	0,00481	0,0037

Примечание. Отрицательные значения δ' при L/h равном 5 и 10, не приводятся как не представляющие интереса.

величины деформации δ', полученные путем сравнения только начального и конечного состояний системы балка - основание, т.е. традиционным методом. Значения деформаций даны в относительных единицах.

$$\delta = Y \Big/ \frac{5}{384} \frac{qL^4}{E_3 I},$$

где $\frac{5}{384} \frac{qL^4}{E_3 I}$ - деформация исследуемой балки при отсутствии упругого основания.

Сравнивая расчетные значения δ, можно отметить, что величина деформаций кровли при прочих равных условиях будет зависеть от количества эта-

пов отработки исследуемого участка. Прирост деформаций по мере отработки выемочного участка будет происходить при любой жесткости закладочного материала, поэтому расчет величины деформаций кровли и нагрузок на рудные целики необходимо производить с учетом всех промежуточных стадий отработки. Данные таблицы позволяют утверждать, что при традиционном методе расчета занижаются деформации кровли, а следовательно, и нагрузки на рудные целики. Это становится наиболее заметным при значениях $k < 5$. При значениях $k <$ I величина деформаций становится отрицательной, что противоречит здравому смыслу. Использование традиционной методики, по-видимому, может обеспечивать удовлетворительные результаты лишь при сравнительно большом количестве стадий отработки и $k >$ I0. В этом случае основной прирост деформаций на каждом этапе отработки будет вызываться, главным образом, снижением жесткости комбинированной опорной системы за счет возведения весьма податливых искусственных целиков, а не только выемкой очистных заходок или камер.

При высокой концентрации очистных работ в пределах этажа, блока, слоя и использовании высокомодульных, в сравнении с извлекаемой рудой, закладочных материалов применение расчетных методик, базирующихся на сравнении только начального и конечного состояния систем, не может считаться достаточно корректным. Наибольшие погрешности могут возникнуть при расчете деформаций кровли и нагрузок на целики для двухстадийных систем разработки с различными размерами очистных выработок I и II стадий.

Следовательно, расчет прочности твердеющей закладки и напряженно-деформированного состояния кровли необходимо производить только на основании тщательного анализа процессов, происходящих при замене рудного массива искусственным. В настоящей статье в качестве примера рассмотрено решение задачи о деформировании искусственной кровли методом балок - плит на упругом основании. Кроме определения величины деформаций данный метод позволяет установить значения изгибающих напряжений в кровле и нагрузок на искусственные и рудные целики. Подобная оценка напряженно-деформированного состояния системы кровля - целики может быть произведена любым из известных методов (механики сплошной среды, теории упругости, строительной механики и др.) при условии обязательного учета состояний системы на всех промежуточных стадиях отработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А.А. Расчет горного давления в лавах пологих пластов. М., Недра, 1964.

2. Борисов А.А., Суглобов С.Н. Методика расчета нагрузок на искусственные целики. Зап. ЛГИ, 1972, т. 61, вып. 1.

3. Ильштейн А.К., Либерман Ю.М., Мельников Е.А. и др. Методы расчета целиков и потолочин камер рудных месторождений. М., Наука, 1964.

4. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. М., Углетехиздат, 1947.

5. Попов Г.Н., Лобанов Д.П. Разработка месторождений радиоактивных руд. М., Атомиздат, 1970.

6. Руппенейт К.В., Давыдова Н.А. Обоснование инженерного метода определения давлений на междукамерные целики. – В кн.: Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород. М., Изд-во АН СССР, 1962, вып. 1.

7. Симвулиди И.А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании. М., Высшая школа, 1973.

8. Тархов А.Г. К вопросу об анизотропии упругих свойств в горных породах. – В кн.: Материалы ВСЕГЕИ. Общая серия. 1940, сб. 5.