

УДК 622.271:622.272

Г.Г.МИЛЕХИН, В.А.АЛЕКСАНДРОВ,  
Н.В.КОВТУН, Н.П.КРАМСКОВ

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ПРИ ПЕРЕХОДЕ С ОТКРЫТЫХ НА ПОДЗЕМНЫЕ ГОРНЫЕ РАБОТЫ

Изложена методика расчета железобетонных перекрытий, сооружаемых на дне карьера для изоляции подземного рудника при переходе на подземные горные работы. Делается вывод о недопустимости упрощенного подхода к определению таких перекрытий, не учитывающего технологию отработки подкарьерных запасов.

Переход с открытых на подземные работы всегда связан с определенными трудностями и, в первую очередь, с изоляцией подземного рудника от карьерного пространства. В последнее время появились предложения по созданию на дне карьера искусственных перекрытий или потолочин [1], под защитой которых можно осуществлять выемку подкарьерных запасов руды. Толщину такого перекрытия, обеспечивающую его несущую способность, обычно рассчитывают на основании принятых параметров обнажений этого перекрытия снизу при отработке запасов камерами или слоями. При этом работа перекрытия рассматривается как свободно опертая плоская плита на жестком основании.

Такой подход был применен, в частности, в ТЭО строительства подземного рудника одного из алмазосных месторождений нашей страны. Уникальность этого месторождения заключается не только в больших запасах и высокой ценности полезного ископаемого, но и в сложности горно-технических условий эксплуатации его. Трудно назвать отрицательный для ведения подземных горных работ природный фактор, который отсутствовал бы на этом месторождении: это и мощный высоконапорный с высокоминерализованными вредными газами водоносный горизонт, и залегание месторождения в мощной толще (несколько сотен метров) соляных пород, наличие метана и нефтебитумных проявлений и т.д. и т.п. Переход на подземные работы усугублен еще и тем, что открытыми работами водоносный горизонт вскрыт и при эксплуатации подземного рудника планируется затопление отработанного карьера. Поэтому требования к устойчивости перекрытия в таких условиях значительно повышаются.

В ТЭО рудника предусматривалась отработка подкарьерных запасов системой разработки с закладкой выработанного пространства горизонтальными слоями в восходящем порядке (см. рисунок). При этом в плане месторождение делится на ленты шириной 6 м, а каждая лента обрабатывается в восходящем по-

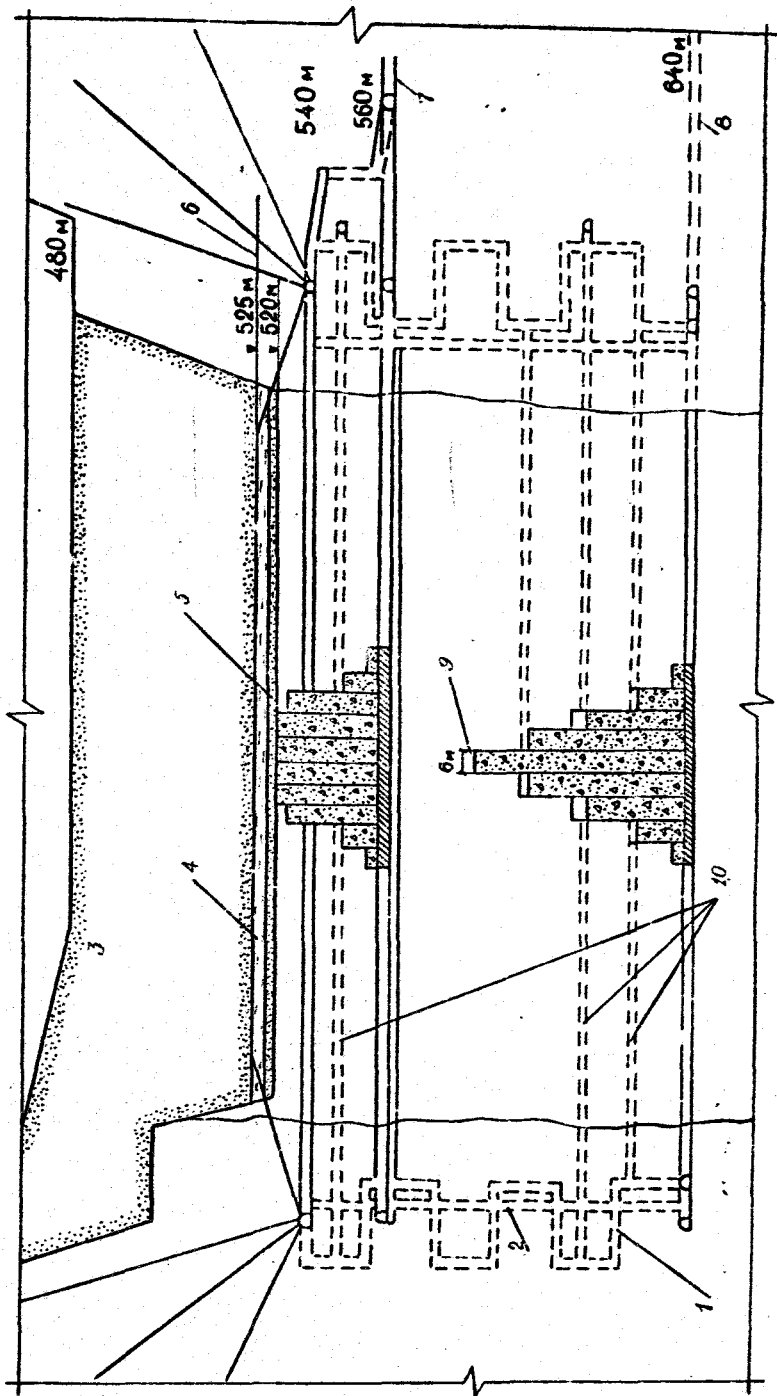


Схема отработки переходной зоны  
 1 - наклонный ствол; 2 - рудоспуск; 3 - породная насыль толщиной 50 м; 4 - льдородный целик; 5 - железобетонное перекрытие; 6 - почва породного горизонта; 7 - дренажный и вентиляционный закладочные горизонты; 8 - откаточный горизонт; 9 - очистная закладка; 10 - слоевые засыпы

рядке горизонтальными слоями высотой 3 м. Порядок отработки самих лент - последовательный от центра к флангам. Расчетами, в которых работа перекрытия рассматривалась как работа свободно опертой плоской плиты на жестком основании, была установлена толщина железобетонного перекрытия 2 м. При этом предусматривалось полное затопление карьера и размещение на э.м. перекрытии льдопородного целика для гидроизоляции.

Однако рассмотрение работы перекрытия как свободно опертой плоской плиты на жестком основании представляется весьма упрощенным и не отражает сути деформационного процесса плиты при предлагаемой технологии отработки подкарьерных запасов переходной зоны. Во-первых, рудный массив переходной зоны постепенно заменяется закладочным массивом, характеризующимся более низким модулем упругости. Во-вторых, при рассмотренной технологии возведения закладочного массива невозможна полная закладка верхнего (под перекрытием) слоя, что вызовет дополнительные деформации перекрытия на отработанных участках рудного тела. В-третьих, сам закладочный массив в процессе схватывания будет подвержен усадке, что увеличит деформации перекрытия на отработанных участках рудного тела.

В связи с этим для определения смещений и напряжений в железобетонном перекрытии должна рассматриваться задача о равновесии упругой плиты на упругом (винклеровском) основании. Причем из-за ограниченных размеров месторождения в плане задача должна решаться не как плоская, а как двумерная. Поскольку при предлагаемом способе сооружения перекрытия его края не заделываются в породу, края плиты свободны от нагрузок. Такой тип граничных условий обуславливает целесообразность использования вариационных методов для определения смещений и напряжений в плите.

Полная потенциальная энергия рассматриваемой системы определяется по формуле

$$\Pi = U_p + U_g + F, \quad (1)$$

где  $U_p$  и  $U_g$  - упругая энергия соответственно плиты и основания;  $F$  - потенциальная энергия сил тяжести.

Условие равновесия плиты в вариационной форме

$$\delta \Pi = \delta U_p + \delta U_g + \delta F = 0. \quad (2)$$

Перекрытие в соответствии с формой месторождения в плане представляет собой эллипс с осями  $2a$  и  $2b$ , предполагаемая толщина перекрытия  $h$  значительно меньше этих размеров, что позволяет использовать для вычисления  $U_p$  соотношения теории пластин [2]:

$$U_p = \frac{D}{2} \iint \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4\sigma \left[ \left( \frac{\partial w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] dx dy, \quad (3)$$

где  $w$  - вертикальные смещения;  $D$  - цилиндрическая жесткость,  $D = E_p h^3 / [12(1 - \nu_p^2)]$ ;  $\sigma = (1 - \nu_p)/2$ ;  $E_p$  и  $\nu_p$  - модуль Юнга и коэффициент Пуассона плиты.

Упругую энергию плиты можно определить, используя соотношение

$$U_g = \frac{1}{2} \iint c(x, y) w_g^2 dx dy, \quad (4)$$

где  $c(x, y)$  - функция жесткости основания, определяемая, во-первых, его типом (руда, выработка, закладка) и, во-вторых, относительным удалением от края перекрытия;  $w_g$  - вертикальное смещение основания.

Для определения функции  $c(x, y)$  воспользуемся решением задачи о нагрузке, равномерно распределенной по границе полубесконечного тела. Согласно [3], нормальные смещения плоскости, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой  $q$  в круге радиуса  $a$ , при  $r < a$  определяются по формуле

$$w = \frac{4(1 - \nu_g^2) q a}{\pi E_g} E\left(\frac{r^2}{a^2}\right), \quad (5)$$

где  $E(r^2/a^2)$  - полный эллиптический интеграл второго рода.

Следовательно, при замене упругого полупространства эквивалентным винклеровским основанием получим соотношение

$$c_g(x, y) = \frac{E_g \pi}{4E\left(\frac{x^2 + y^2}{a^2}\right)(1 - \nu_g^2)a}. \quad (6)$$

В качестве параметра  $a$  следует взять наибольшую полуось эллипса (150 м). Для закладки, если произошло касание перекрытия ( $w_g \geq 0$ ), эквивалентная жесткость может быть вычислена по аналогичной формуле

$$c_f(x, y) = \frac{E_f \pi}{4E\left(\frac{x^2 + y^2}{a^2}\right)(1 - \nu_f^2)a}. \quad (7)$$

В противном случае, когда касания перекрытия нет ( $w_g < 0$ ),  $c_f$  следует принять равным нулю. Аналогично, когда основанием является выработка,

$c_m = 0$ . Приняв  $x, y$  равными нулю, получим

$$c_g \Big|_{r=0} = \frac{E_g \pi}{4E(0)(1 - \nu_g^2)a} = \frac{E_g}{2(1 - \nu_g^2)a}.$$

В самой удаленной от центра точке перекрытия при  $x = a$  и  $y = 0$  получим

$$c_g \Big|_{r=a} = \frac{E_g \pi}{4E(1)(1 - \nu_g^2)a} = \frac{E_g \pi}{4(1 - \nu_g^2)a}.$$

Следовательно, если использовать данную методику перехода от упругого основания к эквивалентному винклеровскому, жесткость основания в центре будет примерно в 1,5 раза меньше, чем у его краев.

Смещение основания  $w_g$  равно смещению плиты  $w$  для точек, опирающихся на руду; для точек, опирающихся на закладку, оно вычисляется по формуле

$$w_g = w - w^*(x, y) - d, \quad (8)$$

где  $w^*(x, y)$  - смещение плиты над точкой  $(x, y)$  в момент завершения закладки в этой точке;  $d$  - неполнота закладки (зазор между поверхностью плиты и поверхностью закладки).

Потенциальная энергия сил тяжести может быть рассчитана по формуле

$$F = - \iint w(h \gamma_p + H \gamma_{\Pi}) dx dy, \quad (9)$$

где  $h$  - толщина плиты;  $H$  - высота породного столба над плитой;  $\gamma_p$  и  $\gamma_{\Pi}$  - удельный вес соответственно плиты и породы.

Перемещения рассчитываются на основании функции  $w = w(x, y)$ , минимизирующей функционал

$$F = \iint \frac{1}{2} D \left\{ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4\sigma \left[ \frac{\partial w}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \right\} + \frac{1}{2} c(x, y) w_g^2 - w(h \gamma_p + H \gamma_{\Pi}) dx dy = \iint \frac{1}{2} D \left\{ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4\sigma \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \right\} - w(h \gamma_p + H \gamma_{\Pi}) dx dy + \iint_F \frac{1}{2} c_p(x, y) w^2 - w(d + w^*(x, y)) dx dy + \iint_{\Omega} \frac{1}{2} c_g(x, y) w^2 dx dy, \quad (10)$$

где  $F$  - поверхность, на которой произошло касание перекрытия и закладки;  $\Omega$  - поверхность невыработанной руды;  $P$  - полная поверхность перекрытия.

Поставленная задача является очень сложной для аналитического решения, поскольку, например, заранее неизвестны форма и размеры поверхности  $F$ . Для нахождения минимума функционала можно использовать метод сеточной минимизации. Для вычисления интегралов на поверхности перекрытия была построена прямоугольная сетка с размером ячейки  $m$  и использовалась специальная квадратурная формула, учитывающая принадлежность узловой точки границе. Производные в соотношении (10) заменены разностными аппроксимациями, для вычисления вторых производных введены дополнительные узлы вне контура перекрытия.

В результате интегралы, входящие в выражение  $F$ , заменяются суммой квадратичных функций от перемещения в узловых точках  $w_{ij}$ . Минимизация этой суммы приводит к системе линейных уравнений относительно неизвестных  $w_{ij}$ . Поскольку матрица этой системы положительно определена и симметрична, для нахождения решений был использован метод Зейделя. После определения перемещений узловых точек  $w_{ij}$  находили максимальный изгибающий момент  $M$  и максимальное растягивающее напряжение  $\sigma_{max}$ , используя соотношения

$$M = D(1 - \sigma) |\Delta w| + \sigma \sqrt{\left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 4 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2};$$

$$\sigma_{max} = 6M/h^2.$$

На основании разработанной математической модели были рассчитаны деформации и напряжения перекрытия при отработке запасов руды в переходной зоне слезовой системой разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Была составлена соответствующая программа, а расчеты проводились на ЭВМ "Искра-103СМ". Выполнено несколько вариантов расчета с различной толщиной плиты и двумя видами нагружения плиты: без затопления карьера и с полным затоплением его.

Как показали выполненные расчеты, деформирование перекрытия представляет собой весьма сложный процесс. На первом этапе отработки запасов от центра к флангам перекрытие в середине месторождения прогибается. При приближении очистной выемки к флангам за счет накопленных деформаций из-за недозакладки общая деформация плиты в этих точках начинает превышать ее значения в середине плиты, и в конечном итоге плита выгибается вверх в средней части.

Толщина плиты пропорциональна ее жесткости. Тем самым уменьшается площадь взаимодействия плиты с рудным и закладочным массивом. Так, при толщине плиты 2 м (без затопления карьера) касание ее с закладочным массивом происходит после выемки соседней ленты, т.е. свободный пролет плиты составляет 12-18 м. При толщине плиты 4 м касание ее с закладочным массивом происходит только после выемки третьей ленты, т.е. свободный пролет составляет от 18 до 24 м.

Напряжения в плите будут возрастать по мере отработки каждой ленты. Для 2-метровой плиты после отработки 22 лент они достигнут 23-24 МПа и превысят предел прочности бетона на одноосное сжатие, что приведет к разрушению плиты. При 4-метровой плите напряжения после отработки 26 лент достигнут 16-17 МПа, что приближается к пределу прочности бетона на одноосное сжатие (20 МПа) и свидетельствует о ненадежности такого перекрытия. Расчетами было установлено, что толщина железобетонного перекрытия при условии создания на нем льдопородного целика без затопления карьера должна быть не менее 5,5 м, а с учетом затопления карьера - не менее 12 м, что значительно отличается от рекомендаций, заложенных в ТЭО строительства подземного рудника.

Таким образом, выполненные исследования убедительно свидетельствуют о необходимости учета технологии отработки месторождения под создаваемыми на дне карьера различного рода поголочинами и перекрытиями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Изыскание эффективной технологии отработки переходной зоны на уральских медно-колчеданных месторождениях / Ю.В.Волков, И.В.Соколов, А.Н.Мишенин, Ю.Г.Антипин // Горный журнал. 1991. № 11.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. М.: Наука, 1987. Т. 7.
3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979.