Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LI, вып. 1, 1966 г.

УДК 622.838.53

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕЖДУКАМЕРНЫХ КАЛИЙНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ГИДРОЗАКЛАДКЕ КАМЕР

Е. П. Сивоконь

При подземной добыче калийных и каменных солей, как известно, широко применяются камерно-столбовые системы разработок, обеспечивающие высокую производительность труда и низкую себестоимость добычи полезного ископаемого. Однако потери в междукамерных целиках при этих системах достигают на отечественных калийных и соляных рудниках 50%. Значительно снизить потери полезного ископаемого можно уменьшением ширины междукамерных целиков за счет заполнения отработанных камер закладкой. Наиболее экономически эффективна гидравлическая закладка отходами обогатительных фабрик, так как в этом случае одновременно решается и вопрос размещения отвалов. Целесообразно также заполнять выработанное пространство специально добываемым для этого закладочным материалом (песком, гравием).

Влияние закладки на несущую способность целиков изучено недостаточно, и метода расчета размеров целиков, заложенных закладкой, не существует. Необходимость оценки несущей способности междукамерных целиков при гидравлической закладке камер особенно остро ощущается в калийной промышленности, где строится ряд новых рудников, на которых предусмотрено использование отходов обогащения в качестве закладочного материала. При этом самим характером обогащения (растворение с собирательным осаждением) определяется применение гидротранспорта с использованием в качестве транспортирующей жидкости рассолов.

Действие гидравлической закладки на целики изучалось в условиях Калушского месторождения калийных солей. Характерной особенностью этого, как и других калийных месторождений Прикарпатья, является неоднородность состава продуктивной толщи и содержание глинистых частиц до 30%. Калийные руды состоят из сильвина, каинита, лангбейнита, полигалита, галита, сцементированных соленосной глиной. Неоднородность состава во многом определяет их физико-механические свойства, которые значительно отличаются от свойств чистых солей.

На Калушском калийном руднике пласты сильвинита и каинита мощностью от 2 до 20 *м* с углом падения 26° разрабатывают камерами шириной 10—12 *м* и длиной 150—200 *м* при ширине междукамерных целиков 4—14 *м* с последующей гидравлической закладкой выработанного пространства отходами переработки. Отходы содержат около 40% глинистых частиц, поэтому длительное время сохраняют высокую влажность и находятся в пластичном состоянии.

Нашими исследованиями на руднике по кернам из скважин, пройденных в целиках с последующим определением влажности и прочности пород, установлена определенная закономерность изменения прочности пород в зависимости от расстояния до закладки (контура целика):

Расстояние до закладки, *м*	3,7	3,3	2,9	2,5	2,1	1,7	1,3	0,9	0,5	0,1
Влажность пород, %	0,55	1,03	1,43	1,73	2,2	2,7	3,5	4,4	4,5	105
Прочность пород, *кГ/см*^{2}	330	295	270	250	215	180	130	70	60	20

Эта закономерность хорошо выражается функцией

$$Y = R_0 e^{-0{,}185\,(l-x)^2},$$

где R_0 — прочность пород естественной влажности;
l — глубина увлажнения пород:
x — расстояние до закладки.

Значительная глубина увлажнения и резкое падение прочности влажных пород снижают несущую способность целиков. В то же время закладка, подпирая целик с боков, повышает его несущую способность.

Для изыскания возможного способа оценки несущей способности калийных целиков с учетом сложного действия гидрозакладками нами обобщены результаты исследований работы целиков с закладкой [Агошков, Требуков, 1961; Паненков, 1961; Требуков, 1963], шахтные наблюдения и лабораторные испытания калийных солей. Исследованием установлено, что процесс разрушения калийных целиков происходит постепенно путем развития трещин разрыва при расширении целиков в стороны смежных камер. Боковое давление закладки, действующее на целик, препятствует развитию трещин, в результате чего увеличивается его несущая способность.

Многие исследователи, изучающие природу прочности горных пород, бетона и других материалов с различным сопротивлением сжатию и растяжению, считают, что разрушение кубиков и призм при испытании на сжатие происходит путем преодоления сопротивления отрыву в направлении, перпендикулярном осевой нагрузке сжатия. В сжимаемых образцах поперечные деформации при появлении первых микротрещин достигают в среднем $1 \cdot 10^4$, что соответствует предельной деформации бетона, каменной соли, мрамора на момент достижения сопротивления отрыву при одноосном растяжении.

По данным наблюдений за характером разрушения калийных солей можно оценить несущую способность междукамерных целиков, заложенных закладкой, на основе линейной теории прочности О. Я. Берга [1962]. По этой теории, при одноосном сжатии до некоторого напряжения $\sigma_т$ в теле не возникает необратимых процессов, а в период повышения напряжений от $\sigma_т$ до разрушающей нагрузки $R_{пр}$ развиваются необратимые микротрещины, нарушается сплошность тела и оно разрушается от разрывов, направленных вдоль действующего усилия. Работа, затрачиваемая на последовательное разрушение, связанное с развитием микротрещин, считается эквивалентной работе, необходимой для преодоления сопротивления отрыву в поперечном направлении по сечению сжимаемого тела. При этом предполагается, что в условиях объемного напряженного состояния, когда на тело действует боковое давление $\sigma_з$, равное сопротивлению материала разрыву $R_р$, для разрушения тела необходимо превысить напряжение сверх значения $R_{пр}$ на величину $kR_{пр}\left(k = 1 - \frac{\sigma_т}{R_{пр}}\right.$ определяется экспериментально). Если величина бокового давления отличается от $R_р$, то повышение прочности пропорционально величине $n_з = \frac{\sigma_з}{R_р}$ и

уравнение прочности для общего случая объемного напряженного состояния имеет вид

$$\frac{\sigma_1}{R_{пр}} = 1 + kn_з, \qquad (1)$$

где σ_1 — сжимающее напряжение.

О. Я. Берг [1960] отмечает, что данные, полученные по уравнению (1), хорошо согласуются с результатами экспериментов.

Учитывая изложенное выше представление о прочности пород, рассмотрим схему работы целика. При работе без закладки в целике (см. рисунок, *а*) при напряжении $\sigma^1 = \sigma_т$ образуются трещины, которые развиваются со временем под действием увеличивающейся нагрузки. Когда напряжение на целик достигнет предельного $R_{пр}$, он теряет несущую способность и разрушается.

Если на целик действует боковое давление $\sigma_з$, создаваемое закладочным материалом (см. рисунок, *б*), то энергия, необходимая для образования трещин, будет частично поглощаться работой сил, возникающих от бокового распора. Первые нарушения возникают лишь при нагрузках, превышающих значение $R_{пр}$, и разрушение целика произойдет при напряжении

$$\sigma_1 = R_{пр}(1 + kn_з).$$

В данном случае несущая способность целика определяется произведением разрушающей нагрузки на его ширину

$$P_н = \sigma_1 A = R_{пр}(1 + kn_з)\,A, \qquad (2)$$

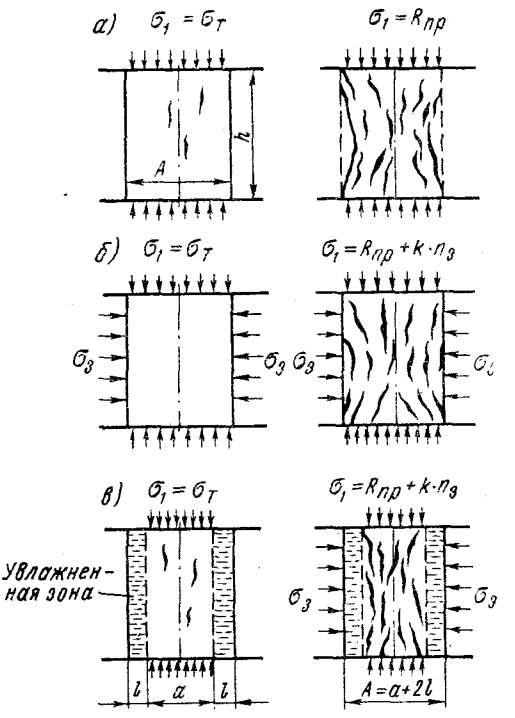


Схема разрушения междукамерных целиков: *а* — без закладки; *б* и *в* — при действии соответственно сухой и гидравлической закладки.

где A — ширина целика;

$R_{пр}$ — прочность целика, принимаемая с учетом формы в зависимости от отношения его ширины к высоте.

Изменение призменной прочности пород достаточно изучено и может быть определено с учетом коэффициентов формы [Кузнецов, 1947; Пеньков, Вопилкин, 1950; Шевяков, 1950].

Влияние формы целика должно также учитываться при выборе коэффициента k, значение которого, по О. Я Бергу, зависит от прочности материала и варьирует от 0,5 до 0,2 при повышении прочности соответственно от 100 до 600 *кГ/см*^{2}. Результаты наших исследований характера образования трещин в соляных породах при одноосном сжатии цилиндрических образцов не расходятся с приведенными данными: для сильвинита, каинита и соленосной глины прочностью 300—400 *кГ/см*^{2} $k = 0{,}3$. При испытаниях, кроме того, замечено, что значение k изменяется в зависимости от отношения ширины образца a к его высоте h. В первом прибли-

жении изменение величины k в зависимости от $\frac{a}{h}$ можно принять по результатам А. М. Пенькова для каменной соли.

Вычисленные нами значения коэффициента k для призматических образцов каменной соли различных размеров находятся в пределах 0,4—0,05 при $\frac{a}{h}$ от 1 до 0,2. Оказалось, что изменение k достаточно точно определяется отношением $\frac{a}{h}$, т. е.

$$k = k_0 \frac{a}{h},$$

где k_0 — характеризует область развития трещин в образцах;

$\frac{a}{h} = 1$ и зависит от физико-механических свойств пород.

Подставив значение k в формулу (2), получим

$$P_н = R_{пр}\left(1 + \frac{a}{h} k_0 n_з\right) A. \tag{3}$$

При гидравлической закладке, как отмечено, целики увлажняются на определенную глубину, в зоне которой прочность пород ниже, чем прочность пород естественной влажности. Влияние влажности особенно сильно сказывается в породах, содержащих глинистые включения. Поэтому несущую способность целиков, окруженных гидравлической закладкой, надлежит определять с учетом изменения прочности пород в увлажненной зоне.

Предположим, что рабочей частью целика, увлажненного с двух сторон на глубину l (см. рисунок, *в*), является неувлажненная зона шириной a. Когда $2l$ составят сравнительно небольшую часть целика, несущую способность увлажненной зоны можно не учитывать, имея в виду увеличение коэффициента запаса. Однако при небольших целиках без определения несущей способности увлажненной зоны обойтись нельзя.

В общем виде несущую способность увлажненного целика можно представить в виде суммы

$$P = P_н + 2P_у, \tag{4}$$

где $P_н$ — несущая способность центральной (неувлажненной) части шириной a, определяемая по формуле (3);

$P_у$ — несущая способность увлажненной зоны — функция прочности пород, глубины и интенсивности увлажнения.

В развернутом виде уравнение (4) имеет вид

$$P = R_{пр}\left(1 + \frac{a}{h} k_0 n_з\right) a + 2P_у \tag{5}$$

и выражает зависимость несущей способности целика P от его высоты и ширины с учетом сложного действия закладки. Для определения этой зависимости при известных прочностных характеристиках пород естественной влажности и заданных размерах целика необходимо знать давление закладки на стенки целика $\sigma_з$, создаваемое закладочным материалом, и несущую способность увлажненной зоны $P_у$. Величину $\sigma_з$ можно определить методами строительной механики, как давление пород на подпорные стенки, или другими методами [Зенков, 1952].

Для определения величины $P_у$ необходимо экспериментально установить глубину увлажнения целиков и закономерность изменения влаж-

ности и прочности пород в зоне увлажнения. Для Калушского рудника, например, несущая способность увлажненной зоны целика шириной

$$P_{у} = R_0 \int_0^l Y\, dx.$$

Подставляя в уравнение (5) значения l и h, а также известные величины $R_{пр}$, k_0, $n_з$, $P_у$, можно определить несущую способность целиков различных размеров с учетом действия закладки. Устойчивость целиков проверяют сравнением их несущей способности с нагрузкой, создаваемой весом покрывающих пород.

В заключение отметим, что уравнение (5) можно использовать для оценки несущей способности целиков с учетом гидравлической и «сухой» закладки при разработке различных месторождений камерной системы. При этом особое внимание необходимо уделить определению исходных величин, характеризующих конкретные условия: прочности пород в сухом и увлажненном состоянии, уровню образования трещин, глубине увлажнения пород в целиках, а также величине давления, создаваемого закладочным материалом.

ЛИТЕРАТУРА

Агошков М. И., Требуков А. Л. Влияние закладки на расчетные размеры междукамерных целиков. Сб. Металлургия и топливо, № 3. Изд-во АН СССР, 1961.

Берг О. Я. *Физические основы теории прочности бетона и железобетона.* Госстройиздат, 1962.

Берг О. Я. Прочность бетона и других материалов, обладающих различным сопротивлением растяжению и сжатию, в условиях сложного напряженного состояния. Тр. ВНИИТранс, № 36, 1960.

Зенков Р. Л. Механика насыпных грунтов. Машгиз, 1952.

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

Паненков Ю. И. О влиянии некоторых факторов на прочность и устойчивость опорных стенок. Зап. ЛГИ, т. XLIV, вып. 1, 1961.

Пеньков А. М., Вопилкин А. А. Расчет опорных целиков при добыче каменной соли. Изд-во АН УССР, 1950.

Требуков А. Л. Применение последующей гидравлической закладки при камерной разработке рудных месторождений. Сб. Разработка и обогащение руд КМА, изд-во АН СССР, 1963.

Шевяков Л. Д. Основы проектирования угольных шахт. Углетехиздат, 1950.