

РАСЧЕТ БЕТОННЫХ ОПОР-СТЕНОК НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ

*В. Н. Семевский, Ю. И. Паненков,
М. П. Маркович*

При двухстадийной разработке мощных круто падающих месторождений с заменой междукamerных рудных целиков бетонными опорами-стенками очень важно правильно выбрать толщину стенки и марку бетона. Методика таких расчетов недостаточно освещена в горнотехнической литературе. Лабораторные исследования на моделях в Ленинградском горном институте показали, что междукamerные бетонные опоры при системах разработки с магазинированием руды или подэтажной отбойкой (при последующем заполнении камер закладкой) сопротивляются боковым нагрузкам подобно тонким плитам с различным закреплением по контуру. Окончательное разрушение стенки под действием боковой нагрузки происходит от потери устойчивости при опрокидывании или сдвиге (оседании стенки).

Проведенные исследования представляют собой, конечно, лишь начальную стадию выявления методики расчета толщины опоры-стенки и марки бетона. Однако они позволили обосновать выбор параметров промышленных опытных работ на Алтын-Топканском руднике. В результате промышленных испытаний должно быть проведено уточнение методики и определены области ее применения.

Предлагаемые в данной статье решения относятся к случаям отработки рудных тел небольшой длины (до 200 м) по простиранию или разработки отдельными участками, разделенными широкими рудными целиками. Бетонные опоры-стенки при этом в значительной степени разгружены от веса вышележащих пород. Боковая нагрузка от давления магазинированной руды или закладочного материала достаточно точно определяется по формуле Янсена, так как соотношение размеров кусков отбиваемой руды и параметров очистных камер позволяет вести расчет по этой формуле без существенных оговорок. Разумеется, и руда и закладочный материал не представляют собой идеальную сыпучую среду, однако, наличие связей не увеличивает, а уменьшает нагрузку, поэтому некоторое завышение значений, полученных по формуле Янсена, пойдет в запас прочности.

Следующие ниже расчеты проведены применительно к условиям участка Алтын-Топканского рудника, на котором мощность рудной залежи изменяется от 20 до 35 м, полезная высота очистных камер — от 20 до 55 м, ширина камер — от 8 до 20 м и объемный вес материала — от 1,4 до 2,5 т/м³. Угол трения материала о стенку принят равным углу внутреннего трения, а коэффициент бокового распора 0,8.

Характер изменения максимальных нагрузок P на опоры-стенки, рассчитанных по формуле Янсена при принятых размерах камер (ширине B , мощности рудного тела m и параметрах сыпучего материала, представлен графиком (рис. 1). Значение боковых нагрузок определилось в пределах $5-50 \text{ т/м}^2$, что и принято в расчете бетонных опор-стенок на прочность и устойчивость.

Расчет бетонных опор-стенок при односторонней нагрузке отбитой рудой или закладкой. При расчете принято следующее: а) бетонные опоры, возведенные взамен междукammerных рудных целиков, рассматриваются как плиты, опирающиеся по контуру; б) равномерно распределенная нагрузка равна максимальной ординате эпюры бокового давления, рассчитанной по формуле Янсена.

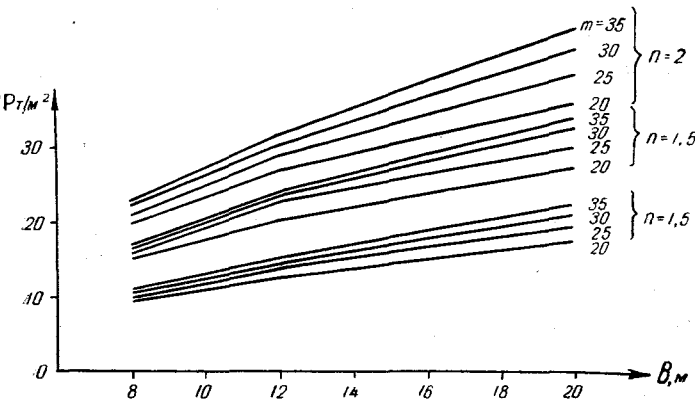


Рис. 1. Зависимость нагрузки от ширины камеры B при различной мощности рудного тела m при высоте камеры $h = 30 \text{ м}$, коэффициенте трения руды по бетону $0,7$, коэффициенте запаса n , равном $1,5$ и 2 и объемном весе материала $\gamma = 1,6$.

В строительной механике для расчетов плит известен ряд методов, из которых наиболее распространены упрощенный метод Маркуса и метод расчета по таблицам Галеркина. Как видно из сравнительных расчетов, значения изгибающих моментов, исчисленные этими двумя методами, практически одинаковы (высота камеры 50 м , равномерно распределенная нагрузка 20 т/м^2):

Мощность рудного тела (длина стенки), м	25	30	40	50
Метод Маркуса, т/м	1182	1462	1752	1822
Табличный метод, т/м	1208	1474	1790	1836

Основным методом расчета принят более простой — табличный.

Приводим коэффициенты, учитывающие соотношения размеров опоры-стенки (длины и высоты) при расчете свободно опирающихся по контуру плит:

m/h	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$K_{\text{тср}}$	0,0965	0,0892	0,0820	0,0750	0,0683	0,0619
$K_{\text{нср}}$	0,0174	0,0210	0,0243	0,0273	0,0298	0,0318
m/h	0,80	0,85	0,90	0,95	1	
$K_{\text{тср}}$	0,0560	0,0506	0,0456	0,0410	0,0368	
$K_{\text{нср}}$	0,0334	0,0348	0,0359	0,0365	0,0368	

Здесь m — мощность рудного тела (размер опоры-стенки вкrest прости-
рания), м ;

h — высота опоры (полезная высота камеры);
 $K_{m_{cp}}, K_{h_{cp}}$ — коэффициенты для расчета моментов относительно m и h ,
 заимствованные из таблиц расчета плит ¹.

Расчетные изгибающие моменты определяются по формулам:

$$M_m = K_{m_{cp}} q m^2; \quad (1)$$

$$M_h = K_{h_{cp}} q m^2, \quad (2)$$

где q — равномерно распределенная нагрузка, m/m^2 .

Опоры-стенки с соотношением размеров сторон $\frac{m}{h} < \frac{1}{2}$ должны рассматриваться по моменту, действующему вдоль короткой стороны, без учета разгрузки от работы плиты вдоль длинной стороны (как балки). Толщина опор-стенок b определяется в соответствии с НитУ 123—55 для изгибаемых бетонных элементов:

$$M \leq R_p \frac{b^2}{3,5}; \quad b = \sqrt{\frac{3,5}{R_p} M}, \quad (3)$$

где M — расчетный изгибающий момент, действующий на 1 м ширины опоры-стенки, $m \cdot m$.

Расчетное сопротивление бетона на чистое растяжение R_p по НитУ 123—55 следующее, m/m^2 :

Марка бетона	50	75	100	150	200
Сжатие осевое (призмная прочность)	220	330	440	650	800
Сжатие при изгибе	270	410	550	800	1000
Растяжение	24	32	40	52	64

Подстановкой в формулу (3) значений R_p для различных марок бетона определяется требуемая ширина опоры в зависимости от действующего изгибающего момента.

Как известно, прирост расчетного сопротивления бетона на растяжение значительно отстает от роста марки бетона. Например, при марке бетона 50 величина $R_p = 24 m/m^2$, а при марке бетона 200 значение $R_p = 64 m/m^2$, т. е. при увеличении марки бетона в 4 раза, прочность бетона на растяжение увеличилась только в 2,67 раза. Поэтому применять в рассматриваемых конструкциях бетоны повышенных марок имеет смысл только при $\frac{m}{h} > \frac{1}{4}$.

Нами проведены расчеты для наиболее вероятных в практике разработки нагрузок и марок прочности бетона.

По результатам этих расчетов построен график рис. 2, по которому в зависимости от величины изгибающего момента и марки бетона можно определить ширину опоры-стенки при разработке с последующей закладкой открытых камер. За пределами этих граничных значений необходимо либо менять параметры разработки (ширину камер и высоту этажа), либо применять системы разработки без обнажения опоры на всю высоту.

Расчет бетонных опор-стенок при разработке с магазинированием руды и выпуском руды под закладкой. Расчет ширины бетонных опор в этом случае выполнен на конкретном примере для рудного тела с углом падения 90° и мощностью 30 м при полезной высоте камер 55 м. Рассмотрим три схемы загрузки бетонной опоры-стенки при положении забоя: I — у нижней части опоры; II — у средней по высоте части опоры; III — у верхней части опоры (в завершающей стадии отбойки).

¹ К а л м а н о к А. С. Расчет пластинок. Госстройиздат, 1959.

Условия расчета по схеме I (рис. 3) приняты следующие: стенка в верхней части закреплена, в нижней и с боков — свободно опирается; опорные реакции расположены в краевых сечениях; нагрузка слева по высоте равномерно распределенная и равна $8,05 \text{ т/м}$; загрузка справа принято по треугольной эпюре с максимальной ординатой $4,4 \text{ т/м}$; высота забоя 5 м — на расстоянии 10 м от дна камеры; расчет загрузочной стенки ведется на ширину 1 м .

По условию равновесия, сумма проекций на горизонтальную ось всех сил, действующих на стенку, должна равняться нулю, откуда реакции $A + B = 98,6 \text{ т}$ (рис. 3). Рассматривая вырезанный элемент из опоры стенки как консоль, заделанную в точке B , и исходя из условия, что алгебраическая сумма прогибов

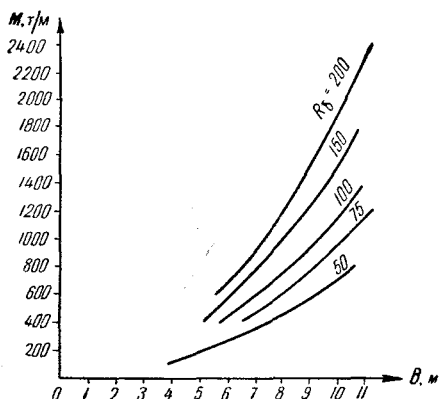


Рис. 2. Толщина опор-стенок в зависимости от изгибающего момента и марки

бетона при $\frac{m}{h} \leq \frac{1}{4}$.

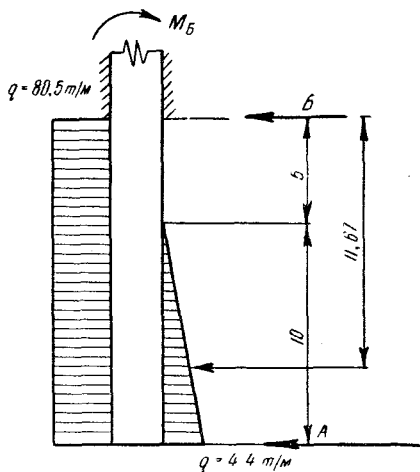


Рис. 3. Расчетная схема I.

консоли от загрузения слева и справа равна нулю, реакция в точке $A = 32,2 \text{ т}$. Из условия $\Sigma M_B = 0$ изгибающий момент, действующий в заделанной опоре, равен 165 т/м .

Для бетона марки 50 величина $b = 4,9 \text{ м}$.

Расчет по схеме II аналогичен, но величины нагрузок (рис. 4) и расчетная эпюра (рис. 4, б) иные. При решении задачи получим: $A + B = 80,2 \text{ т}$; $A = 5,35 \text{ т}$; $M_B = 305 \text{ т/м}$; $b = 6,66 \text{ м}$.

Нагрузки при расчете по схеме III представлены на рис. 5, а; приведенная расчетная схема — на рис. 5, б. Аналогично предыдущему находим: $A + B = 67,68 \text{ т}$; $A = 2,34 \text{ т}$; $M_B = 339,9 \text{ т/м}$; $b = 7,03 \text{ м}$.

Как следует из сравнения трех схем, наибольший изгибающий момент соответствует положению забоя у верхней части опоры-стенки. Таким образом, схема III может быть рекомендована в качестве расчетной.

Расчет бетонных опор-стенок на устойчивость. В соответствии с результатами лабораторных исследований, устойчивость опоры-стенки, заделанной у основания и односторонне нагруженной, определяется сопротивлением бетона разрушению по наклонным к вертикали плоскостям. Опора-стенка рассчитывается как балка шириной $a = 1 \text{ м}$, вес которой уравнивает часть нагрузки, снижая величину перерезывающих сил (рис. 6).

Расчет на устойчивость проводится проверкой толщины опоры-стенки, рассчитанной на прочность. Для этого определяем величину усилия,

которое может воспринять бетон сжатой зоны в наклонном сечении (НитУ 123—55)

$$Q_6 = \frac{0,15 R_n ab^2}{c}, \quad (4)$$

где c — длина проекции наклонного сечения на ось элемента;

R_n — нормативное сопротивление бетона изгибу (НитУ 123—55).

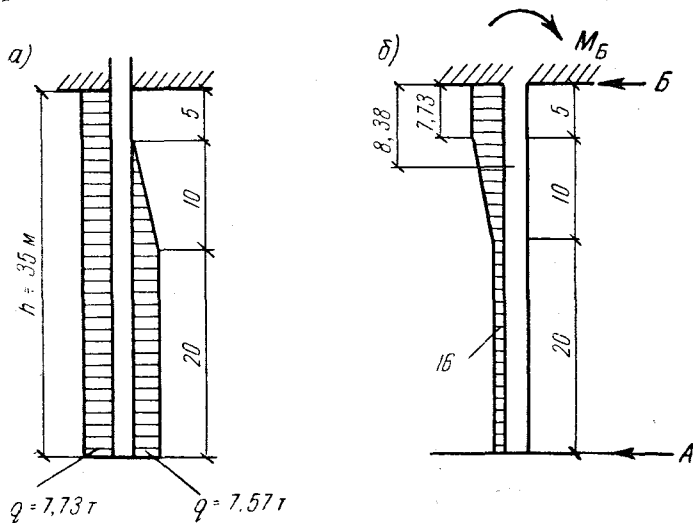


Рис. 4. Расчетная схема II.

При лабораторных исследованиях трещины на моделях опор-стенок образовывались примерно под углом 45° к продольной оси испытываемых образцов. Тогда $c = b$ и $Q_6 = 0,15 R_n ab$. При $a = 1$ м $Q_6 = 0,15 R_n b$.

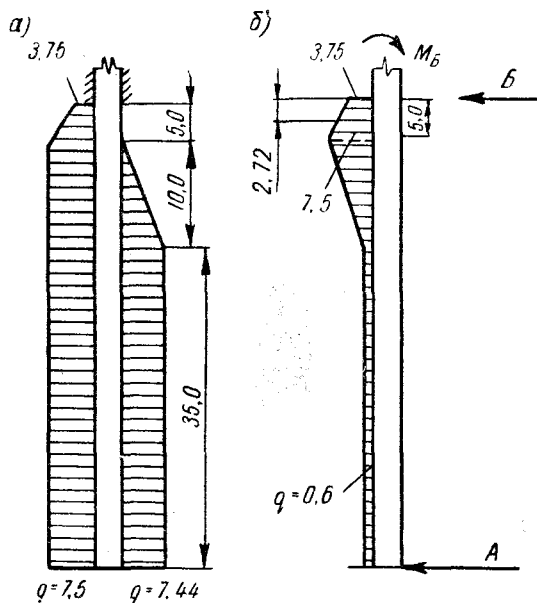


Рис. 5. Расчетная схема III.

При $Q_6 > Q$ (Q — перерезывающая сила по контуру опоры-стенки) устойчивость стенки обеспечена с достаточным запасом прочности. Если $Q_6 < Q \frac{qh}{2}$, необходимо проверить расчетное разгрузочное действие удерживающего момента, возникающего от собственного веса опоры-стенки, приняв расчетную нагрузку на опрокидывание стенки

$$q_{\text{опр}} = \frac{2(Q - Q_6)}{h}. \quad (5)$$

Опрокидывающий момент

$$M_{\text{опр}} = \frac{q_{\text{опр}} h^2}{2}. \quad (6)$$

Удерживающий момент

$$M_{\text{уд}} = \frac{\gamma_6 h ab^2}{2}, \quad (7)$$

где γ_6 — объемный вес бетона, т/м^3 .

Коэффициент устойчивости должен отвечать условию

$$K = \frac{M_{уд}}{M_{опр}} \geq 1,5.$$

Для примера проверим на устойчивость толщину опоры-стенки, рассчитанной по схеме I (рис. 3), полагая, что нагрузка справа отсутствует.

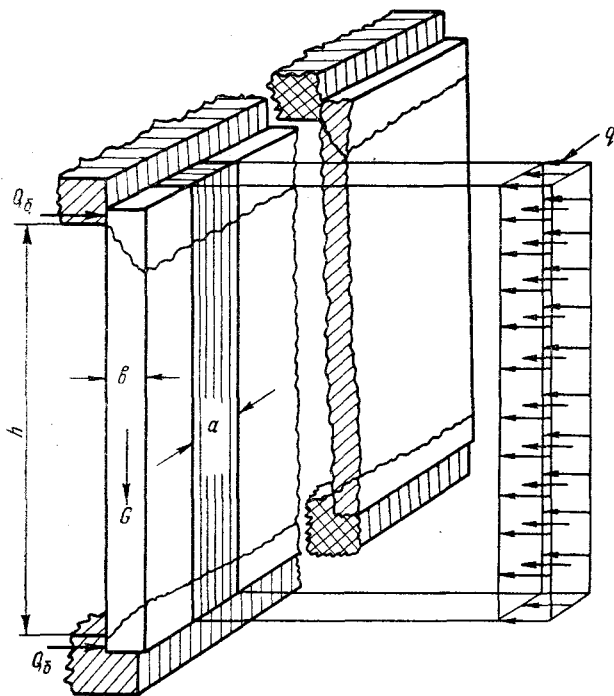


Рис. 6. Схема к расчету опоры-стенки на устойчивость (G — вес опоры-стенки).

При расчете на прочность, когда марка бетона 50, ширина стенки — 4,9 м. Принимаем нормативное сопротивление бетона изгибу равным 270 т/м^2 .

Тогда по формуле (4)

$$Q_{\delta} = 0,15 \cdot 270 \cdot 4,9 = 198 \text{ т.}$$

Согласно рис. 4,

$$Q = \frac{qh}{2} = \frac{8,05 \cdot 15}{2} = 60,4 \text{ т.}$$

Следовательно, опора-стенка устойчива.

Изложенный метод расчета на устойчивость справедлив при условии хорошего сцепления опоры-стенки с породами.

Заключение

Рассмотренные методы позволяют определять параметры бетонных опор расчетным путем. В соответствии с конкретными условиями выбирается расчетная схема, производится расчет на прочность и устойчивость, принимается значение ширины опоры, наибольшее из полученных.

В расчетах не предусмотрен учет действия взрывных нагрузок (исключая общие коэффициенты запаса), так как величину заряда можно ограничить и принять порядок взрывания, обеспечивающий безопасность работ.

При выборе марки бетона следует учитывать время, которое проходит между возведением и полной нагрузкой опоры. Обычно между возведением опоры и началом отбойки руды во вторичных камерах проходит несколько месяцев. Это допускает понижение марки бетона, так как за это время он твердеет и увеличивает прочность.

Если по расчету требуется прочность бетона на сжатие, равная R , а загрузка опоры намечается через n дней, то по логарифмической зависимости нарастания прочности бетона можно определить его требуемую марку

$$R_{28} = \frac{R_n \lg 28}{\lg n}. \quad (8)$$

Предлагаемый метод дает возможность более правильно и экономично проектировать подземную разработку с заменой рудных целиков бетонными опорами.
