Записки Ленинградского Горного Института Том 1 XIV, 1941
Annales de l'Institut des Mines à Léningrad. Vol. XIV, 1941

Распределение напряжений в междукамерных целиках

Проф. *В. Д. Слесарев*

Die Verteilung von Spannungen in den Zwischenkammerpfeilern

Prof. *W. D. Slesareff*

Рассмотрим случай междукамерных целиков, имеющих форму стенки неограниченно большой длины („галерейная" система разработки).

Как известно, междукамерные целики под действием веса вышележащей толщи пород находятся в определенном напряженном состоянии, могущем вызвать сильную деформацию целика и даже привести к его разрушению.

Для правильного решения вопроса о характере напряженного состояния целика и испытываемых им деформаций необходимо иметь правильное представление о способе приложения нагрузки на целик, так как последний определяет характер деформации — пластичной или, наоборот, упруго-хрупкой.

Как известно, при быстром загружении тело ведет себя как тело хрупкое, при медленном — в нем развиваются пластические деформации. Обращаясь к целикам, следует отметить, что полной нагрузки, равной весу всей вышележащей толщи пород, они достигают через очень значительное время, когда площадь разработки достигнет весьма значительных размеров, что может произойти через 2—3—5 лет, в зависимости от глубины залегания разрабатываемого месторождения, характера комплекса пород кровли, а также формы вырабатываемого участка.

Кроме того следует иметь в виду, что самое вступление в работу новых камер, определяющее возрастание нагрузки на целик, происходит не сразу, а достаточно медленно и при этом без скачков, а постепенно. Достигнув максимальной величины — полного веса вышележащей толщи пород, — нагрузка не снимается с целика, а продолжает действовать неограниченно большое время, что заставляет при рассмотрении деформаций целика учесть и влияние времени. Таким образом, следует признать, что все условия загружения междукамерных целиков и сама работа нагрузки отвечают условиям проявления пластических деформаций.

Горные породы в большей или меньшей степени обладают свойством пластичности, причем пластические деформации их происходят или под действием больших давлений (опыты Адамса и Кокера над гранитами и известняками, опыты Кика над углем и сланцами), или при длительном действии нагрузки (наблюдения Гертнера над песчаником главного квершлага шахты „Венценелаус" (Glückauf, 1929), наблюдения Морена на пласте „Франсуа" (Revue de l'Industrie Minerale, 1926), Шпакелера — над уменьшением высоты целиков на шахте „Королева Луиза", Ф. Ф. Глушенкова—на пласте „Мазурка" и т. д.). Следует отметить, что обычные испытания механических свойств образцов горных пород протекают в условиях быстрого загружения их и потому характер деформаций образцов не отвечает полностью характеру деформаций междукамерного целика.

Это обстоятельство необходимо иметь в виду при рассмотрении вопроса как напряженного состояния целика, так и его деформаций.

Общая схема действия сил на междукамерный целик представлена на рис. 1.

Под влиянием веса вышележащей толщи пород в целиках создаются силы бокового распора, равного (Слесарев В. Д. — „Крепление подземных горных выработок"):

$$p = \frac{\gamma \cdot h \cdot (a + A) \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{a}, \qquad (1)$$

где p — сила бокового распора на единицу высоты целика, a — ширина целика, имеющего форму стенки неограниченно большой длины, A — ширина камеры, φ — угол внутреннего трения породы целика, γ — вес единицы объема пород вышележащей толщи, h — глубина залегания.

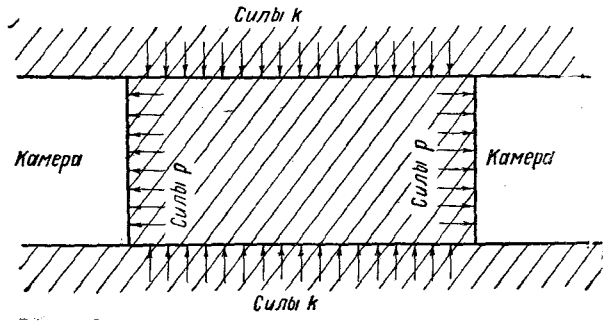


Рис. 1. Общая схема.

Этой силе, стремящейся „выпучить" стенку целика в камеру, будут противодействовать силы трения и сцепления породы целика.

Цельность твердого тела, как известно, обусловливается наличием в нем молекулярных сил, действующих между частицами тела. Принимая показателем этого внутреннего давления сопротивление породы деформации и рассматривая это сопротивление как некоторую внешнюю силу H, пропорциональную молекулярному давлению (Терцаги), можем получить представление об условиях равновесия целика под действием нагрузки от веса вышележащих масс породы.

Очевидно, что в данном случае сила H, противодействующая перемещению материала целика в камеру, представляет сопротивление материала целика сжатию.

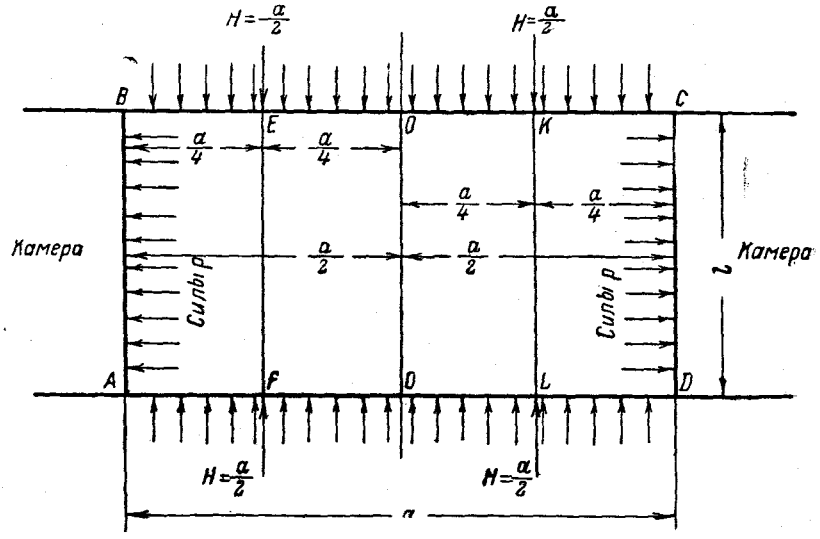


Рис. 2. Схема напряженного состояния в целике.

Называя сопротивление сжатию породы целика через $K_{сж}$ будем иметь:

$$H = aK_{сж}. \qquad (2)$$

Следует отметить, что, согласно исследованиям Рейто, разрушение образца в зависимости от его формы и комбинации приложенных усилий происходит или по поверхностям, определяемым объемной сеткой линий скольжения (линий Людерса), или только по одной плоскости. Принимая во внимание возможность, при известной степени деформации, разрушения образца по всем поверхностям объем-

ной сетки линий скольжения и исчезновение „затрудненных" для деформации мест, можно в видах безопасности принять

$$H = K_{сж}.$$

Для выяснения возможного напряженного состояния междукамерного целика при данных условиях нагрузки, разделим целик осевой вертикальной плоскостью пополам и рассмотрим напряженное состояние каждой половины, заменив действие отброшенной половины соответствующими внутренними силами, согласно рис. 2.

Как известно, общее уравнение кривой давления для породы в потолке выработки имеет вид:

$$y = \frac{p}{2H}(lx - x^2), \tag{3}$$

где h — глубина залегания выработки, γ — вес единицы объема породы, H — боковые реакции, l — ширина пролета выработки.

(Начало координат принято в левом верхнем углу выработки, ось х-ов направлена вправо вдоль потолка, а у-ов вверх — перпендикулярно потолку).

Рассматривая схему рис. 2, видим, что каждая из половин целика — $OCDO$ или $ABOO$ — находятся в тех же условиях действия сил, как и породы кровли выработки (стоит только мысленно повернуть половину целика на 90° так, чтобы силы p были обращены вниз).

Отсюда следует, что общий вид уравнения кривой давления для целика должен быть такой же, как и для породы в кровле выработки, т. е.

$$y = \frac{\gamma h (a + A) \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{2aH}(lx - x^2), \tag{4}$$

где l — высота целика.

Для половины целика уравнение кривой давления будет иметь вид:

$$y = \frac{\gamma h (a + A) \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{4 \cdot \frac{a}{2}\frac{H}{2}}[lx - x^2]$$

или

$$y = \frac{\gamma h (a + A) \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{a \cdot H}(lx - x^2). \tag{5}$$

Заменяя H его значением из выражения (2), будем иметь окончательно:

$$y = \frac{\gamma h (a + A) \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{a^2 \cdot K_{сж}}(lx - x^2). \tag{6}$$

Максимальное значение y будет при $\frac{l}{2}$, т. е.

$$y_{max} = \frac{\gamma h (a + A) l^2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{4a^2 K_{сж}}. \tag{7}$$

Для рассматриваемой половины целика — шириной, воспринимающей нагрузку, будет $\frac{a}{2} - y_{max}$, поэтому, зная значение y_{max}, определяем необходимую ширину целика, имеющего форму стенки неограниченно большой длины, из выражения:

$$\left[\frac{a}{2} - \frac{\gamma h (a + A) l^2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{4a^2 K_{сж}}\right]\frac{K_{сж}}{n} = \frac{\gamma h (A + a)}{2}$$

или

$$2(K_{сж} - \gamma hn)a^3 - 2\gamma hnAa^2 - \gamma hal^2 \operatorname{tg}^2\left[\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right] - $$
$$- \gamma hAl^2 \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) = 0, \tag{8}$$

Здесь n — коэфициент запаса прочности.

Выражением (8) можно пользоваться для определения ширины целика, причем следует отметить, что определение ширины целика в предположении, что $H = K_{сж}$, как и следовало ожидать, дает бо́льший запас прочности для целиков бо́льшей высоты, чем для целиков небольшой высоты.

Рассматривая выражение (8), видим, что несущей нагрузку частью целика нами принимается только часть $a - 2y_{max}$, в действительности же часть целика, несущая нагрузку, будет больше, что вытекает из общих положений внецентренного сжатия (в данном случае мы имеем аналогию с внецентренным сжатием), указывающих, что даже при предельном эксцентриситете, равном $\frac{a}{4}$ (для половины целика), напряжения на расстоянии y_{max} от края целика будут сжимающими и равными средней нагрузке. Принятое положение увеличивает запас прочности наших расчетов.

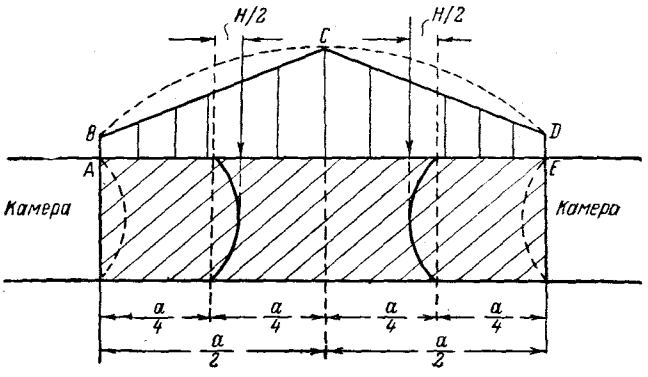


Рис. 3. Диаграмма напряженного состояния целика.

Величина y_{max} представляет эксцентриситет равнодействующей силы $\frac{H}{2}$, а зная величину эксцентриситета, мы можем получить представление о характере напряженного состояния целика, что и иллюстрируется диаграммой рис. 3.

Эпюра напряжений *ABCDE* указывает на неравномерность распределения напряжений по ширине целика и на увеличение напряжения в центральной части его, что согласуется с данными исследования Рейто, Зибеля и Помпа.

Рис. 4 показывает эпюру распределения напряжений по Помпу и Зибелю при сжатии металлических образцов. Если учесть, что действительное распределение напряжений несколько отличается от линейного закона, что показано на рис. 3 пунктиром, то аналогия между данными Зибеля, Помпа, Рейто и полученными нами выводами будет полная.


Рис. 4. Эпюра распределения напряжений.

Указанный характер распределения напряжений вполне объясняет возможность появления растягивающих усилий в боковых стенках целика, что, например, отмечалось наблюдениями в Соликамске над целиками шахты № 1.

Если принять целик заделанным в кровлю и почву (в кровле и почве остается полезное ископаемое), то положение кривой давления меняется, что вызывает концентрацию напряжений по периферии целика в кровле и почве; в среднем же сечении целика напряжения, как и в рассмотренном случае, концентрируются в центре, но с меньшей интенсивностью.

Zusammenfassung

Unter dem Einfluss von Gebirgsgewicht entstehen in den Zwischenkammerpfeilern die Kräfte von Seitendruck (Fig. 1), die Grösse von welchen nach der Gleichung (1) ausgedrückt wird: diese Kräfte suchen das Material von Pfeiler in die Kammer zu treiben. Als Gegenkraft für dieses Bewegen ist der Widerstand des Materials von Pfeiler gegen Druck: die Grösse von diesem Widerstande ist mit der Formel (2) ausgedrückt.

Die Gleichung der Druckkurve in dem Pfeiler wird (6) und die maximala Durchbiegung — y_{max} — von dieser Kurve (7) sein. Wegen der Druckkurvenbildung wird der Pfeiler den Druck nicht in ganzen Querschnitt, sondern mit dem Teile $a - 2y_{max}$ aufnehmen. Spannungsdiagramm ist aus der Fig. 3. zu ersehen. Die erforderliche Pfeilersbreite kann nach der Gleichung (8) berechnet werden.