Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени Горного института, том XXIII, 1949

I. Горное дело

Определение плотности крепления очистного пространства

Доц. О. Б. Бокий

§ 0. Цель и содержание работы

При проектировании норм расхода крепежного леса на угледобычу особо важное значение имеет правильное определение расхода леса на крепление очистных выработок, составляющего от 50 до 70% общего расхода леса на угледобычу [1].

В основу расчетов расхода леса на очистные работы кладутся данные о плотности крепления очистного пространства, принятые в утвержденных комбинатами и согласованных с Горнотехнической инспекцией паспортах крепления очистных забоев. Однако плотность крепления в паспортах ничем не обосновывается и обычно значительно превышает действительную. В таблице 1 показана плотность крепления по паспортам и в действительности по трем шахтам, полученная автором в результате наблюдений на этих шахтах в июне — августе 1947 г.

Таблица 1

Условное название шахт	Плотность крепления стоек/м²	
	по паспорту	в действительности
А	2,06	от 1,17 до 1,30 в среднем 1,24
Б	от 3,45 до 4,35 в среднем 3,86	от 1,03 до 1,90 в среднем 1,58
В	1,91	от 1,02 до 1,85 в среднем 1,40

Поскольку за первое полугодие 1947 г. во всех лавах названных шахт было только четыре случая частичного обрушения кровли очистного пространства, есть основание полагать, что плотность крепления очистного пространства, предусматриваемая паспортами крепления, превосходит действительно необходимую.

Целью настоящей работы является попытка дать метод для теоретического определения необходимой плотности крепления очистных забоев на основе теории предельных и эквивалентных пролетов, развитой В. Д. Слесаревым [5].

В соответствии с этой целью в первых двух параграфах работы дано краткое изложение теории предельных и эквивалентных пролетов по В. Д. Слесареву; в § 3 дается приложение этой теории к вопросу определения величины горного давления на крепь выработок, имеющих постоянную ширину, в § 4 изложен предлагаемый автором метод последовательных приближений для расчета ожидаемого давления на крепь очистных забоев; в § 5 дается формула для определения необходимой плотности крепления очистного забоя; в § 6 даны результаты расчета давления по предлагаемому методу для конкретного случая практики —1-й восточной лавы на шахте *Б* в Донецком бассейне.

§ 1. Предельные пролеты

Пусть (рис. 1) прямоугольник *ABCB* представляет собой выработку бесконечно большой длины, пройденную горизонтально в толще однородной горной породы; обозначим ширину выработки буквой *l*, а толщину пород от кровли выработки до поверхности буквой *h*.

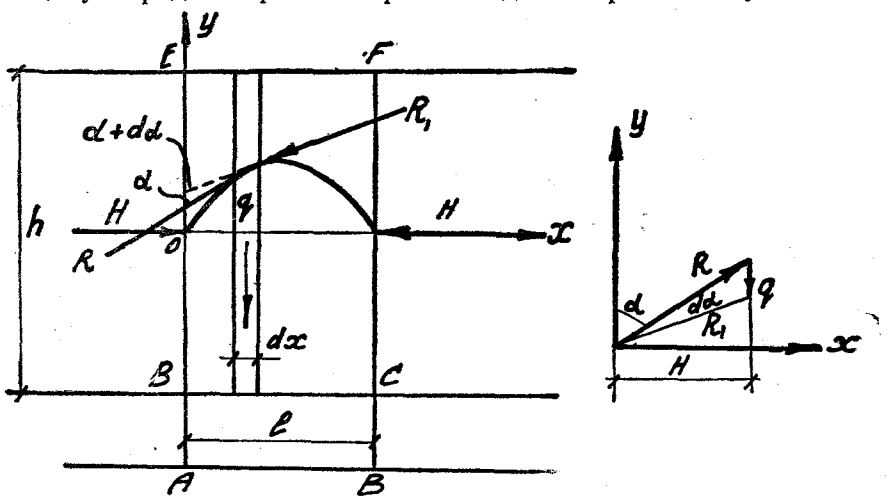


Рис. 1.

Вырежем мысленно двумя параллельными сечениями, расположенными на расстоянии 1 м и проведенными перпендикулярно оси выработки, элемент выработки длиной 1 м и рассмотрим условия равновесия столба породы *BEFC* в кровле выработки.

Столб породы *BEFC* находится под действием следующих сил:

1) собственного веса, представляющего собой равномерно распределенную нагрузку, интенсивностью

$$p = \gamma h,$$

где γ — объемный вес пород, и

2) реакций боковых массивов неподработанных пород H и H. Реакции боковых массивов представляют собой равнодействующие сил равномерно распределенных нагрузок, действующих по граням *BE* и *FC*, следовательно, их точки приложения находятся на середине

высоты столба породы *BEFC*, т. е. в точках, ординаты которых при принятом расположении координат равны нулю.

Выделим двумя вертикальными сечениями, параллельными оси выработки, элемент столба кровли шириной dx и рассмотрим условия равновесия этого элемента.

Рассматриваемый элемент столба породы будет находиться под действием сил собственного веса

$$q = \gamma h dx \tag{1}$$

и боковых реакций R и R_1, образующих с осью y углы α и $\alpha + d\alpha$.

Если данный элемент под действием названных сил находится в равновесии, то силы q, R и R_1 образуют треугольник (рис. 1 справа).

Проектируя силовой треугольник на ось y, получим:

$$R\cos\alpha - R_1\cos(\alpha + d\alpha) - q = 0, \tag{2}$$

а проектируя его на ось x, имеем:

$$H = R\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = R_1\cos\left[\frac{\pi}{2} - (\alpha + d\alpha)\right]. \tag{3}$$

Определяя из последнего равенства значения R и R_1

$$R = \frac{H}{\sin\alpha} \quad \text{и} \quad R_1 = \frac{H}{\sin(\alpha + d\alpha)} \tag{4}$$

и подставляя их в выражение (2), получим:

$$H\operatorname{ctg}\alpha - H\operatorname{ctg}(\alpha + d\alpha) - q = 0,$$

или

$$H[\operatorname{ctg}(\alpha + d\alpha) - \operatorname{ctg}\alpha] = -\gamma h dx.$$

Но

$$\operatorname{ctg}(\alpha + d\alpha) - \operatorname{ctg}\alpha = d\operatorname{ctg}\alpha = d\left(\frac{dy}{dx}\right),$$

следовательно:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{\gamma h}{H}. \tag{5}$$

Полученное дифференциальное уравнение есть дифференциальное уравнение кривой давления, характеризующей условия равновесия столба породы в кровле выработки. Интегрируя его два раза и определяя произвольные постоянные из условий:

при

$$x = \frac{l}{2} \qquad \alpha = 0,$$

при

$$x = 0 \qquad y = 0,$$

получаем уравнение кривой давления в виде

$$y = \frac{\gamma h}{2H}(lx - x^2). \tag{6}$$

По В. Д. Слесареву силы H можно считать равными

$$H = K_p h, \tag{7}$$

где K_p — временное сопротивление породы на растяжение. Тогда уравнение кривой давления перепишется так:

$$y = \frac{\gamma}{2K_p}(lx - x^2). \tag{8}$$

Максимальная стрела подъема кривой давления будет при $x = \frac{l}{2}$ и равна

$$y_{max} = \frac{\gamma l^2}{8K_p}. \tag{9}$$

Эта величина определяет эксцентриситет точки приложения силы H в среднем (наиболее опасном) сечении mn столба породы $BEFC$ (рис. 2).

Вследствие внецентренного приложения силы A в поперечном сечении mn столба породы $BEFC$ могут возникнуть не только сжимающие, но и растягивающие напряжения.

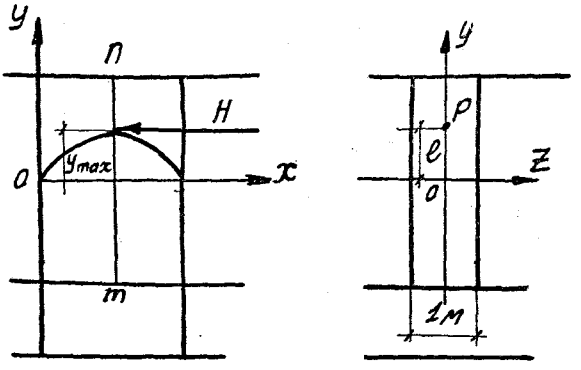


Рис. 2.

Величина напряжений при эксцентричном сжатии коротких стоек дается формулой:

$$\sigma_x = -\frac{P}{F} - \frac{Pe\,y}{I_z}, \tag{10}$$

где P — сжимающая сила, F — площадь поперечного сечения стойки, e — эксцентриситет точки приложения силы P, I_z — момент инерции поперечного сечения стойки, y — ордината точки, в которой определяется напряжение [6].

В нашем случае

$$P = H = K_p h; \qquad F = bh = h,$$

так как ширина сечения принята равной 1 м;

$$I_z = \frac{bh^3}{12} = \frac{h^3}{12}; \qquad e = y_{max}.$$

Подставляя эти значения в уравнение (10), имеем:

$$\sigma_x = -\frac{K_p h}{h} - 12\frac{K_p h y_{max}}{h^3} y = -K_p\left(1 + 12\frac{y_{max}}{h^2} y\right). \tag{11}$$

Чтобы найти величину и знак максимальных напряжений в точке m опасного сечения столба породы, подставляем в уравнение (11) значение

$$y = -\frac{h}{2}.$$

Тогда имеем:

$$\sigma_{x(\max)} = -K_p\left(1 - \frac{6}{h} y_{\max}\right).$$

Для того чтобы напряжения в точке m были сжимающими, необходимо, чтобы

$$1 - \frac{6}{h} y_{\max} > 0,$$

т. е. чтобы

$$y_{\max} < \frac{h}{6}.$$

Если

$$y_{\max} = \frac{h}{6},$$

то напряжения в точке m равны нулю:

$$\sigma_{x\,(\max)} = 0.$$

Если же

$$y_{\max} > \frac{h}{6},$$

то

$$\sigma_{x\,(\max)} = -K_p\left(1 - \frac{6}{h} y_{\max}\right) > 0,$$

т. е. в точке m появляются растягивающие напряжения. Так как эксцентриситет точки приложения силы $H(y_{\max})$ зависит от ширины выработки l (см. выражение 9), то отсюда следует вывод, что характер напряженного состояния пород кровли выработки определяется ее шириной.

Называя ширину выработки, при которой в опасном сечении кровли не возникает растягивающих напряжений, а сжимающие напряжения равны нулю, первым предельным пролетом и обозначая ее через L_1, определяем ее значение из выражения (9), куда вместо $y_{\max}$ подставляем значение $\frac{h}{6}$:

$$\frac{h}{6} = \frac{\gamma L_1^2}{8K_p}, \tag{12}$$

откуда

$$L_1 = \sqrt{\frac{8K_p\,h}{6\gamma}} = 1{,}15\sqrt{\frac{K_p\,h}{\gamma}}. \tag{13}$$

Таким образом, при ширине выработки $l \leq L_1$ в опасном сечении кровли действуют только сжимающие напряжения, и кровля испытывает только упругие деформации.

Если ширина выработки будет больше L_I, в опасном сечении кровли возникают растягивающие напряжения, и кровля начинает испытывать как упругие, так и остаточные деформации. Однако появление остаточных деформаций еще не означает исчерпания несущей способности кровли, т. е. способности ее выдерживать без обрушения свой собственный вес.

Исчерпание несущей способности кровли наступает тогда, когда в опасном сечении возникает так называемый шарнир текучести или пластический шарнир. При расчете балок по несущей способности [7] в формулы вместо момента сопротивления следует подставить пластический момент сопротивления, определяемый уравнением

$$\overline{w} = w \cdot \frac{h}{z},$$

где h — высота сечения (в данном случае мощность кровли),
z — плечо внутренней пары,
w — момент сопротивления.

Плечо внутренней пары равно моменту инерции, поделенному на статический момент полусечения балки

$$z = \frac{I_z}{M_{ст}} = \frac{\frac{h^3}{12}}{\frac{h^2}{8}} = \frac{2}{3} h,$$

следовательно, пластический момент сопротивления

$$\overline{w} = \frac{hw}{\frac{2}{3} h} = \frac{3}{2} w.$$

Если умножить обе части выражения (12) на h, то получим

$$\frac{h^2}{6} = \frac{\gamma h l^2}{8K_p};$$

так как

$$\frac{h^2}{6} = w,$$

то для условий образования пластического шарнира должно соблюдаться равенство

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{h^2}{6} = \frac{\gamma h L_{IIa}^2}{8K_p},$$

где буквой L_{IIa} обозначена ширина выработки, при которой исчерпывается несущая способность кровли, названная В. Д. Слесаревым вторым предельным пролетом „a".

Из последней формулы получаем:

$$L_{IIa} = \sqrt{\frac{2K_p h}{\gamma}} = 1{,}41 \sqrt{\frac{K_p h}{\gamma}}. \qquad (14)$$

При ширине выработки, удовлетворяющей условию

$$L_I < l \leqslant L_{IIa},$$

кровля выработки испытывает максимально возможные деформации изгиба без нарушения сплошности (без образования трещин).

Если ширина выработки будет превосходить значение L_{IIa}, в опасном сечении кровли растягивающее напряжения будут возрастать. Определим ширину выработки, при которой максимальное растягивающее напряжение в опасном сечении кровли достигает величины временного сопротивления породы на растяжение, т. е., когда

$$\sigma_{x(\max)} = K_p.$$

Для этого подставим в выражение (11) вместо σ_x его значение $+K_p$ и вместо y его значение $-\frac{h}{2}$;

имеем:

$$K_p = -K_p\left(1 - \frac{12y_{\max}}{h^2} \cdot \frac{h}{2}\right),$$

откуда

$$y_{\max} = \frac{h}{3}.$$

Подставляя это значение $y_{\max}$ в равенство (9), получаем

$$\frac{h}{3} = \frac{\gamma l^2}{8K_p},$$

откуда

$$= L_{II} = \sqrt{\frac{8K_p h}{3\gamma}} = 1{,}63\sqrt{\frac{K_p h}{\gamma}}. \qquad (15)$$

Ширина выработки L_{II} называется вторым предельным пролетом.

Таким образом, при ширине выработки, удовлетворяющей условию

$$L_{IIa} < l \leqslant L_{II},$$

в кровле ее неизбежно образование трещин.

Подробное изучение явления обрушения в кровле выработки показывает, что образование трещин в кровле может не привести к полному обрушению ее, так как постепенно развивающиеся трещины вызывают уменьшение эксцентриситета точки приложения силы H, что может привести к установлению равновесия между внутренними и внешними силами. В этом случае обрушение кровли, дойдя до некоторого предела, может затухнуть.

Полное обрушение пород кровли будет происходить тогда, когда трещины пронижут всю толщу пород до поверхности. Ширину выработки, при которой трещины в кровле доходят до дневной поверхности, назовем третьим предельным пролетом и определим следующим образом.

Допустим, что при ширине выработки l в кровле ее образовалась трещина mk, высотою s (рис. 3). Допуская для упрощения, что глубина трещины доходит до нулевой точки эпюры напряжения [3], получим, что в случае, хотя бы мгновенного равновесного состояния, сила H должна проходить через центр тяжести треугольника эпюры

напряжений, т. е. на расстоянии $\frac{1}{3}(h-s)$ от поверхности; с другой стороны, эта сила проходит через вершину кривой давления, т. е. на расстоянии $\frac{h}{2}-y_{\max}$ от поверхности. Отсюда имеем равенство

$$\frac{1}{3}(h-s)=\frac{h}{2}-y_{\max}. \tag{16}$$

Если трещина распространяется до поверхности, то $s=h$. Подставляя это значение в равенство (16), получаем

$$y_{\max}=\frac{h}{2}.$$

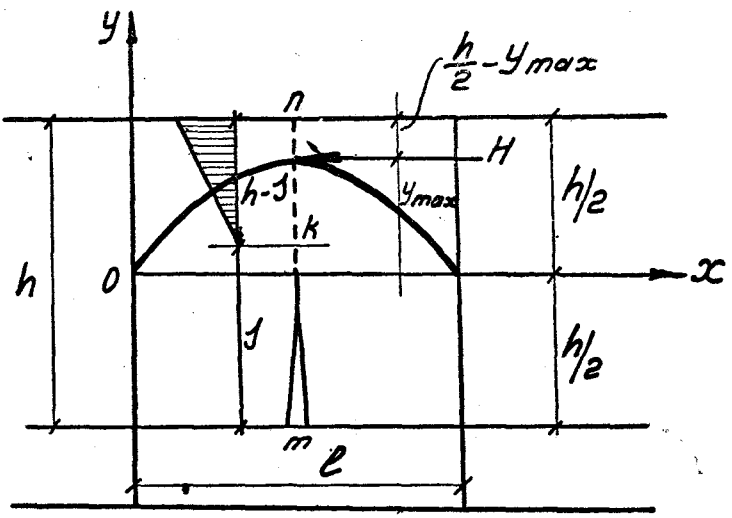


Рис. 3.

Обозначая ширину выработки, при которой проходит полное обрушение пород кровли, через $L_{\text{ш}}$, получаем для определения ее уравнение

$$\frac{h}{2}=\frac{\gamma L_{\text{ш}}^2}{8\kappa_p},$$

откуда

$$L_{\text{ш}}=\sqrt{\frac{8K_ph}{2\gamma}}=2{,}00\sqrt{\frac{K_ph}{\gamma}}. \tag{17}$$

§ 2. Эквивалентные пролеты

Теория предельных пролетов была развита для выработок бесконечно большой длины, т. е. для таких выработок, в которых взаимодействие между внешними и внутренними силами проявляется только по боковым стенкам выработки. Примером таких горных выработок, проходимых по пластам угля при его разработке, могут служить штреки, а также длинные бремсберги, уклоны и разрезные печи. Все

перечисленные выработки имеют длину, значительно превосходящую размеры их поперечного сечения (иногда в тысячи раз), что и позволяет считать их „бесконечно длинными".

В выработках, имеющих ограниченную длину по сравнению с размерами поперечного сечения, к которым относятся различного рода камеры, а также очистные выработки, взаимодействие окружающих пород проявляется не только на стенках выработки, но и на торцовых сторонах их.

В первом приближении можно допустить, что показателем тех условий равновесия, в которых находится толща пород в кровле камеры, является соотношение площади камеры S и периметра ее сечения в плане P.

Отношение площади сечения камеры к ее периметру назовем „гидравлическим радиусом" выработки. Обозначая его буквой R, имеем

$$R = \frac{S}{P}.$$

Если камера имеет размеры $a \cdot b$ (рис. 4), то ее гидравлический радиус равен

$$R = \frac{ab}{2(a+b)}. \qquad (18)$$

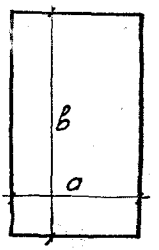


Рис. 4.

Значение гидравлического радиуса выработки бесконечно большой длины получим из выражения (18), если найдем предел, к которому стремится величина R при $b \to \infty$:

$$\lim_{b \to \infty} R = \lim_{b \to \infty} \frac{ab}{2(a+b)},$$

отсюда

$$a = 2R, \qquad (19)$$

т. е. *ширина выработки бесконечно большой длины равна двойной величине ее гидравлического радиуса.* Отсюда следует, что для каждой выработки ограниченного контура можно найти эквивалентную ей выработку бесконечно большой длины, кровля которой находится в тех же условиях равновесия, что и кровля данной камеры, если вычислить гидравлический радиус камеры и принять за ширину искомой эквивалентной бесконечно длинной выработки двойную величину гидравлического радиуса данной камеры.

Называя эту величину „эквивалентным пролетом" камеры, получаем, следовательно,

$$l_{экв} = 2R_{кам} = 2\frac{S_{кам}}{P_{кам}}. \qquad (20)$$

Для выработок бесконечно большой длины, шириной „a", эквивалентный пролет равен ширине выработки, т. е.

$$l_{экв} = a. \qquad (21)$$

При определении значения гидравлического радиуса выработки необходимо принимать во внимание только „действующий" периметр выработки, т. е. ту часть полного периметра выработки, по которой не нарушена связь между давящими породами. Поэтому при разра-

ботке тонких пластов с разделением этажа на подэтажи (рис. 5) гидравлический радиус лавы верхнего подэтажа, наклонной высоты $l_{пэ}$ и шириной b, будет равен

$$R_в = \frac{l_{пэ} b}{l_{пэ} + b}, \tag{22}$$

а для лавы нижнего подэтажа

$$R_н = \frac{l_{пэ} b}{l_{пэ} + 2b}. \tag{23}$$

Соответственно этому эквивалентные пролеты для лав выразятся уравнениями

$$l_{экв.в} = \frac{2l_{пэ} b}{l_{пэ} + b} \tag{24}$$

и

$$l_{экв.н} = \frac{2l_{пэ} b}{l_{пэ} + 2b}. \tag{25}$$

Из формул (24) и (25) можно сделать заключение о том, что *значение эквивалентного пролета* в различных точках выработанного

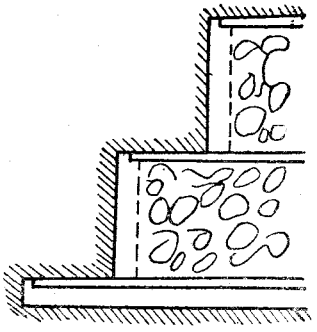


Рис. 5.

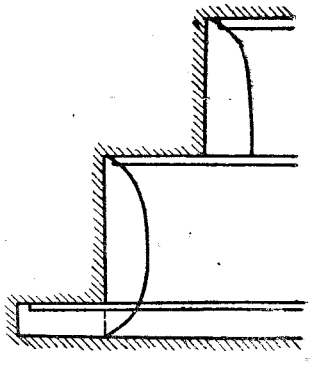


Рис. 6.

пространства лавы *не постоянно*, но изменяется по мере удаления от боковых стенок выработки. Если в эти формулы вместо значения $l_{пэ}$ подставить последовательно возрастающие значения длины забоя, начиная от верхнего кутка и, нанеся полученные значения $l_{экв}$ по точкам, соединить их сплошной линией, то мы получим кривую изменения величины эквивалентного пролета вдоль забоя лавы. На рис. 6 показаны построенные таким образом кривые эквивалентных пролетов двух подэтажей при разработке сплошной системой с разделением этажа на подэтажи. Из этого рисунка видно, что наибольшее значение эквивалентного пролета в верхней лаве будет в ее нижнем кутке, а в нижней лаве — в ее середине.

Так как устойчивость выработки обратно пропорциональна ее эквивалентному пролету и так как, как это будет показано ниже, давление пород кровли прямо пропорционально этой величине, то, следовательно, наибольшее давление кровли в верхней лаве будет наблю-

даться в ее нижнем кутке, а в нижней лаве — посредине. Доказательством этого положения могут служить наблюдения над количеством поломанных стоек в органном ряду, производившиеся инж. Карповым [2]. На рис. 7 показаны кривая эквивалентных пролетов лавы и кривая числа поломанных стоек в органном ряду. Совершенная идентичность обеих кривых подтверждает развитые выше положения об эквивалентных пролетах выработки.



Рис. 7.

§ 3. Горное давление

Из уравнения второго предельного пролета „a", при котором, как сказано выше, полностью используется несущая способность толщи пород кровли, следует, что

$$\gamma h - 2K_p \frac{h^2}{L^2_{II\,a}} = 0. \qquad (26)$$

Заменяя в этом выражении букву $L_{II\,a}$ буквой l и написав в правой части равенства (26) вместо нуля букву p (так как в общем случае правая часть равенства (26) не равна нулю), получим

$$\gamma h - 2K_p \frac{h^2}{l^2} = p. \qquad (27)$$

В этой формуле все члены левой части имеют размерность т/м², т. е. размерность напряжений, следовательно и величина p имеет ту же размерность.

Выражение γh представляет интенсивность силы веса пород кровли или иначе нагрузку на 1 кв. м площади кровли выработки.

Выражение

$$2K_p \frac{h^2}{l^2}$$

представляет напряжение в кровле выработки от изгиба под влиянием собственного веса при условии исчерпания несущей способности кровли, то есть ту часть нагрузки на 1 кв. м, которую может воспринять толща пород кровли выработки без разрушения. Разность между этими величинами, т. е. значение p, будет, следовательно, представлять ту часть общей нагрузки на 1 кв. м кровли выработки, которая не может быть поглощена кровлей, т. е. будет представлять собой давление пород кровли, передаваемое на крепь выработки.

Таким образом, давление кровли на крепь бесконечно длинной выработки может быть рассчитано по формуле

$$p = \gamma h - 2K_p \frac{h^2}{l^2}. \qquad (28)$$

В общем случае выработки ограниченного контура в плане в формуле (28) буква l должна быть заменена $l_{экв}$, т. е. в этом случае давление на крепь выработки будет определяться формулой

$$p = \gamma h - 2K_p \frac{h^2}{l^2_{экв}}. \qquad (29)$$

Из формулы (29) видно, что давление пород кровли на крепь выработки может быть равно нулю, если $h = 0$, или, если

$$\gamma h = 2K_p \frac{h^2}{l^2_{экв}}.$$

Последнее имеет место при $l_{экв} = L_{IIa}$. Обозначая соответствующее значение h через h_{IIa}

$$h_{IIa} = \frac{\gamma L^2_{IIa}}{2K_p},$$

получаем, что, при некотором значении h, лежащем в пределах

$$0 < h < h_{IIa},$$

величина давления должна иметь максимум.

Назовем мощность пород, при которой давление достигает максимального значения, „действующей" мощностью пород и обозначим ее буквой $h_д$.

Для определения значения $h_д$ возьмем первую производную от p по h и, приравняв ее нулю, решим полученное уравнение относительно h; имеем:

$$\frac{dp}{dh} = \gamma - 4K_p \frac{h^2}{l^2_{экв}} = 0,$$

откуда

$$h_д = \frac{\gamma l^2_{экв}}{4K_p}. \qquad (30)$$

Таким образом, выражение для определения максимальной величины давления пород кровли получает вид:

$$p_{max} = \gamma h_д - 2K_p \frac{h^2_д}{l^2_{экв}}. \qquad (31)$$

Введение понятия „действующей" мощности пород кровли имеет следующее значение. Если при попытке определить давление пород кровли по формуле (29) получится отрицательное (или небольшое, по абсолютной величине положительное) значение p, то это будет указывать на то, что значительная часть веса пород поглощается сопротивлением самой породы и давление на крепь может оказать только часть толщи пород, мощность которой равна $h_д$, создающая

максимальное возможное давление. Поэтому определение давления следует начинать с определения „действующей" мощности по формуле (30). Если при этом окажется, что „действующая" мощность больше истинной мощности пород, или равна ей, то давление должно быть рассчитано по формуле (29); если же „действующая" мощность будет меньше истинной мощности, определение давления следует производить по формуле (31).

Пример 1. Если $l_{экв} = 20$ м, $h = 10$ м, $\gamma = 2{,}0$ т/м³ и $K_p = 17$ т/м³, то

$$h_д = \frac{\gamma l^2_{экв}}{4K_p} = \frac{2{,}0 \cdot 20^2}{4 \cdot 17} = 11{,}8 \text{ м}.$$

Так как $h_д > h$, то давление пород будет равно, по формуле (29)

$$p = \gamma h - 2K_p \frac{h^2}{l^2_{экв}} = 2{,}0 \cdot 10 - 2 \cdot 17 \cdot \frac{10^2}{20^2} = 11{,}5 \text{ т/м}^2.$$

Пример 2. Если при тех же значениях $l_{экв}$, γ и K_p истинная мощность пород кровли $h = 40$ м, то $h_д < h$ и давление на крепь равно (31)

$$p = h_д\gamma - 2K_p \frac{h^2_д}{l^2_{экв}} = 2{,}0 \cdot 11{,}8 - 2 \cdot 17 \frac{11{,}8^2}{20^2} = 11{,}8 \text{ т/м}^2.$$

При попытке определить давление по формуле (29) получаем:

$$p = \gamma h - 2K_p \frac{h^2}{l^2_{экв}} = 2{,}0 \cdot 40 - 2 \cdot 17 \cdot \frac{40^2}{20^2} = -56{,}0 \text{ т/м}^2.$$

Изложенный метод определения величины горного давления может быть применен только в том случае, когда кровля выработки представлена одним однородным пластом породы. Если же толща пород кровли выработки состоит из нескольких пластов, имеющих различную мощность, объемный вес и временное сопротивление растяжению, то для определения давления следует использовать „метод скользящей выработки", предложенный В. Д. Слесаревым.

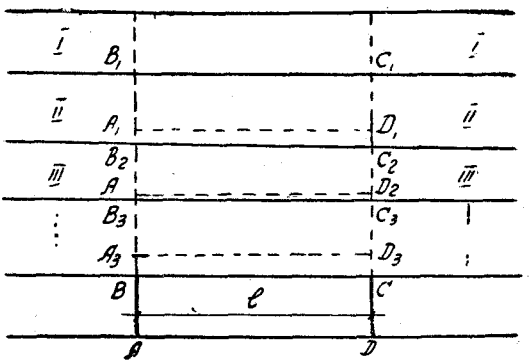


Рис. 8.

Представим себе выработку $ABCD$ бесконечно большой длины, шириной l м, кровля которой сложена породами I, II, III... (считая сверху) (рис. 8).

Пусть мощности пород h, объемный вес γ и временное сопротивление растяжению их K_p будут иметь значения, соответственно,

для породы I . . . . h_1, γ_1 и K_1
„ „ II . . . . h_2, γ_2 „ K_2
„ „ III . . . . h_3, γ_3 „ K_3

и т. д.

Мысленно представим себе, что выработка $ABCD$ заняла положение $A_1B_1C_1D_1$ так, что в кровле ее расположена только порода I.

Определим действующую мощность породы I h_1'* по формуле (30) и давление p_1, оказываемое ею на крепь выработки $A_1B_1C_1D_1$, по формуле (29) или (31), в зависимости от того, будет ли h_1' больше или меньше h_1. Так как в действительности выработки $A_1B_1C_1D_1$ нет, то давление p_2 со стороны породы I будет воспринято породой II. Учтем это давление, введя понятие „приведенного" объемного веса породы. Приведенный объемный вес породы будем определять по формуле

$$\gamma_{\text{прив}} = \frac{p + h\gamma}{h}, \tag{32}$$

где буквы имеют прежнее значение**. Таким образом „приведенный" объемный вес породы II будет равен:

$$\gamma_2' = \frac{p_1 + \gamma_1 h_2}{h_2}.$$

Передвинем теперь выработку $ABCD$ в положение $A_2B_2C_2D_2$, так что кровлей ее будет являться порода II. Определим „действующую" мощность породы II, с учетом давления на нее породы I, по формуле

$$h_2' = \frac{\gamma_2' l_{\text{экв}}^2}{4K_2}.$$

Если получится, что $h_2' > h_2$, то, значит, порода II давит на крепь выработки $A_2B_2C_2D_2$ всем весом, за исключением той части своего „приведенного" веса, которая будет воспринята самой породой, т. е. давление на крепь будет равно:

$$p_2 = p_1 + \gamma_2 h_2 - 2K_2 \frac{h_2^2}{l_{\text{экв}}^2} = \gamma_2' h_2 - 2K_2 \frac{h_2^2}{l_{\text{экв}}^2}. \tag{33}$$

Если же $h_2' < h_2$, то на выработку $A_2B_2C_2D_2$ будет давить только действующая мощность породы II, т. е. в этом случае давление будет равно:

$$p_2 = \gamma_2' h_2' - 2K_2 \frac{h_2'^2}{l_{\text{экв}}^2}. \tag{34}$$

Давление p_2 будет в действительности воспринято породой III, поэтому вычисляем приведенный объемный вес породы III по формуле

$$\gamma_3' = \frac{p_2 + \gamma_3 h_3}{h_3}.$$

Передвигаем выработку в положение $A_3B_3C_3D_3$, определяем h_3' и в зависимости от того, будет ли h_3' больше или меньше h_3, определяем давление породы II на породу III по формуле

$$p_3 = \gamma_3' h_3 - 2K_3 \frac{h_3^2}{l_{\text{экв}}^2},$$

или

$$p_3 = \gamma_3' h_3' - 2K_3 \frac{h_3'^2}{l_{\text{экв}}^2}.$$

---

* В дальнейшем тексте для удобства письма действующие мощности пород будем обозначать штрихами, т. е. h_1', h_2', h_3' и т. д.

** В дальнейшем тексте для упрощения письма „приведенные" объемные веса пород будем обозначать штрихами: γ_2', γ_3' и т. д.

Продолжая этот процесс дальше, мы в конце концов передвинем „скользящую“ выработку в положение $ABCD$ и определим давление пород кровли на ее крепь.

Пример 3.

$$l_{экв} = 20 \text{ м}$$
$$h_1 = 40 \text{ м}, \quad \gamma_1 = 2{,}0 \text{ т/м}^3, \quad K_1 = 17 \text{ т/м}^2$$
$$h_2 = 5 \text{ м}, \quad \gamma_2 = 2{,}5 \text{ т/м}^3, \quad K_2 = 50 \text{ т/м}^2$$

$$h_1' = \frac{\gamma_1 l_{экв}^2}{4K_1} = \frac{2{,}0 \cdot 20^2}{4 \cdot 17} = 11{,}8 \text{ м}.$$

Так как $h_1' < h$, то

$$p_1 = \gamma_1 h_1' - 2K_1 \frac{h_1'^2}{l_{экв}^2} = 2{,}0 \cdot 11{,}8 - 2 \cdot 17 \cdot \frac{11{,}8^2}{20^2} = 11{,}8 \text{ т/м}^2,$$

$$\gamma_2' = \frac{p_1 + \gamma_2 h_2}{h_2} = \frac{11{,}8 + 5 \cdot 2{,}5}{5} = \frac{24{,}3}{5} = 4{,}9 \text{ т/м}^3,$$

$$h_1' = \frac{\gamma_2' l_{экв}^2}{4K_2} = \frac{4{,}9 \cdot 20^2}{4 \cdot 50} = 9{,}8 \text{ м}.$$

Так как $h_2' > h_2$, то

$$p_2 = p_1 + \gamma_2 h_2 - 2K_2 \frac{h_2^2}{l_{экв}^2} = \gamma_2' h_2 - 2K_2 \frac{h_2^2}{l_{экв}^2} =$$

$$= 4{,}9 \cdot 5 - 2 \cdot 50 \cdot \frac{5^2}{20^2} = 18{,}9 \text{ т/м}^2.$$

413790.

Пример 4. Все значения прежние, но $h_2 = 25$ м.

Так как при этом $h_2' < h_2$, то

$$p_2 = \gamma_2' h_2' - 2K_2 \frac{h_2'^2}{l_{экв}^2} =$$

$$= 4{,}9 \cdot 9{,}8 - 2 \cdot 50 \cdot \frac{9{,}8^2}{20^2} = 24{,}0 \text{ т/м}^2.$$

§ 4. Определение давления кровли в выработанном пространстве очистных забоев

Во всех вычислениях предыдущего параграфа эквивалентный пролет выработки, для которой производится расчет давления кровли, предполагается известным заранее. Такое положение имеет место для выработок бесконечно большой длины, а также для камер, эквивалентный пролет которых, при известных их размерах, может быть найден по формуле (20). При попытках определить давление в выработанном пространстве очистных забоев появляется затруднение, заключающееся в том, что для определения эквивалентного пролета и необходимо знать ширину рабочего пространства лавы, а последняя зависит от давления пород кровли. Действительно, если считать, что кровля в пределах рабочего пространства лавы не должна терять сплошности, то предельная допустимая ширина выработанного про-

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ ГЛАВНАЯ БИБЛИОТЕКА

странства лавы должна быть определена по формуле второго предельного пролета „a“, т. е. по формуле

$$L = \sqrt{\frac{2Kh}{\gamma}}, \qquad (36)$$

где h — мощность пород непосредственной кровли пласта,

K — допускаемое напряжение на растяжение для пород непосредственной кровли и

γ — объемный вес пород непосредственной кровли.

Однако из предыдущего ясно, что под понятием „объемного веса пород кровли“ следует понимать не физический, а „приведенный“ объемный вес, определяемый по формуле

$$\gamma' = \frac{p + \gamma h}{h},$$

где p — давление, оказываемое на непосредственную кровлю вышележащей толщей пород. Так как величина p зависит от ширины выработки, то получается „порочный круг“: для определения давления пород в выработанном пространстве лавы надо знать ширину рабочего пространства ее, а для определения этой последней надо знать давление пород кровли. Для преодоления этого затруднения нами предлагается производить одновременное определение давления пород кровли и ширины рабочего пространства лавы методом последовательных приближений. Для этой цели определяем по формуле (36) предельную возможную ширину рабочего пространства лавы, которое назовем нулевым приближением, вычисляем по формуле (24) или (25) значение эквивалентного пролета лавы и, пользуясь методом скользящей выработки, определяем приведенный объемный вес γ' пород непосредственной кровли пласта и давление p' на 1 кв. м. Полученное значение γ' подставляем в формулу (36) и определяем новое значение L', которое назовем первым приближением. По значению L' находим эквивалентный пролет лавы и вновь повторяем весь расчет, получая новое значение приведенного веса γ'' и давления кровли p''. По значению γ'' вычисляем второе приближение L'' и т. д.

Пример 5. В условиях последнего примера § 3, длина лавы $a = 100$ м.

Нулевое приближение

$$L^\circ = \sqrt{\frac{2K_2h_2}{\gamma_2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \cdot 25}{2{,}5}} = 31{,}6 \text{ м.}$$

$$l^\circ_{\text{экв}} = \frac{2aL^\circ}{a + 2L^\circ} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 31{,}6}{100 + 2 \cdot 31{,}6} = 38{,}7 \text{ м.}$$

Применение изложенного метода определения горного давления для случая двух пород в кровле выработки показано в табл 2, помещенной на страницах 20 и 21. Таким образом предельная возможная ширина рабочего пространства лавы равна 25,4 м, а максимальное давление кровли выработанного пространства 43,0 т/м².

Опыт расчетов показывает, что четвертое и пятое приближения практически совпадают и, следовательно, решают поставленную задачу.

Наибольшую трудность при определении давления на крепь выработанного пространства представляет подбор физико-механических характеристик пород, залегающих выше пласта. В горно-технической литературе имеются данные о физико-механических свойствах пород, характеризующие, как правило, отдельные пласты, залегающие в непосредственной близости к пластам угля. Данные же о физико-механических свойствах пород, залегающих на больших расстояниях от пластов угля, отсутствуют. Вследствие этого при подборе физико-механических характеристик пород, необходимых при расчете давления в выработанном пространстве, мы вынуждены пользоваться данными классификации М. М. Протодьяконова, выбирая цифры по названиям пород, показанным на геологическом разрезе свиты. При этом временное сопротивление породы растяжению мы будем принимать равным 1/20 временного сопротивления сжатию, которое, как известно, равно:

$$K_{сж} = 100f\ \frac{кг}{см^2} = 1000f\ \frac{т}{м^2},$$

где f — коэффициент крепости породы по Протодьяконову [4]. Запас прочности будем принимать равным 3.

§ 5. Определение плотности забойщицкого крепления лавы

Определение плотности забойщицкого крепления лавы произведем по методу М. М. Протодьяконова [4]. Согласно М. М. Протодьяконову, диаметр стойки может быть найден по формуле

$$d = \sqrt[3]{\frac{Pm}{8k}}, \tag{37}$$

где P — давление на стойку в кг,

m — длина стойки (мощность пласта) в см,

k — допускаемое напряжение на сжатие материала стойки в кг/см².

Диаметр и длина стойки связаны между собой эмпирической зависимостью

$$d = \sqrt{m}. \tag{38}$$

Обозначая плотность крепления (число стоек на 1 кв. м площади выработанного пространства) через n, получим давление на одну стойку

$$P = \frac{p}{n}, \tag{39}$$

где p — давление кровли в кг/см², определяемое по методу скользящей выработки.

Подставляя значения m и P в формулу (37), находим, что плотность забойщицкого крепления может быть найдена по формуле

$$n = \frac{p}{8kd}\ \text{стоек/м}^2. \tag{40}$$

Величину допускаемого напряжения на сжатие материала стойк можно брать с небольшим запасом прочности (не более 2), так ка срок службы стойки в выработанном пространстве лавы невели

L_2^i	$l^i_{экв} = \frac{2L^i}{a + 2L^i}$ м	$h_1^i = \frac{\gamma_1 \cdot l^{i^2}_{экв}}{4K_1}$ м	$p_1^i = \gamma_1 h_1^i - 2K_1 \frac{h_1^{i^2}}{l^{i^2}_{экв}}$ т/м²
1	2	3	4
$L_2^\circ = 31{,}6$	$l^\circ_{экв} = 38{,}7$	$h_1^\circ = \frac{2{,}0 \cdot 38{,}7^2}{4 \cdot 17} =$ $= 88{,}3$	$p_1^\circ = 2{,}0 \cdot 40{,}0 - 2 \cdot 17 \cdot \frac{40{,}0^2}{38{,}7^2} =$ $= 43{,}6$ *
$L_2' = 24{,}3$	$l'_{экв} = \frac{2 \cdot 24{,}3 \cdot 100}{100 + 2 \cdot 24{,}3} =$ $= 32{,}7$	$h_1' = \frac{2{,}0 \cdot 32{,}7^2}{4 \cdot 17} =$ $= 31{,}4$	$p_1' = 2{,}0 \cdot 31{,}4 - 2 \cdot 17 \cdot \frac{31{,}4^2}{32{,}7^2} =$ $= 31{,}4$
$L_2'' = 25{,}8$	$l''_{экв} = \frac{2 \cdot 25{,}8 \cdot 100}{100 + 2 \cdot 25{,}8} =$ $= 34{,}0$	$h_1'' = \frac{2{,}0 \cdot 34{,}0^2}{4 \cdot 17} =$ $= 34{,}0$	$p_1'' = 2{,}0 \cdot 34{,}0 - 2 \cdot 17 \cdot \frac{34{,}0^2}{34{,}0^2} =$ $= 34{,}0$
$L_2''' = 25{,}4$	$l'''_{экв} = \frac{2 \cdot 25{,}4 \cdot 100}{100 + 2 \cdot 25{,}4} =$ $= 33{,}7$	$h_1''' = \frac{2{,}9 \cdot 33{,}7^2}{4 \cdot 17} =$ $= 33{,}5$	$p_1''' = 2{,}0 \cdot 33{,}5 - 2 \cdot 17 \cdot \frac{33{,}5^2}{33{,}7^2} =$ $= 33{,}5$

а кроме того, изложенный метод определения давления на крепь дает максимально возможные значения этой величины, в свою очередь определяемые с известным запасом прочности (2—3).

§ 6. Определение давления кровли в 1-й восточной лаве шахты *Б*

1-я восточная лава шахты *Б* имеет длину 72 м. Геологический разрез по стволу шахты показан на рис. 9. Характеристика пород, принятая для расчета давления в очистном пространстве, дана в таблице 3.

* См. § 3.

Таблица 2

$\gamma_2^i = \frac{p_1^i + \gamma_2 h_2}{h_2}$ т/м³	$h_2^i = \frac{\gamma_2 \, l_{экв}^{i2}}{4K_2}$ м	$p_2^i = \gamma_2^i h_2^i - 2K^2 \frac{h_2^{i2}}{l_{экв}^{i2}}$ т/м²	$L_2^{i+1} = \sqrt{\frac{2K_2 h_2}{\gamma_2^i}}$ м
5	6	7	8
$\gamma_2^\circ = \frac{43{,}6 + 2{,}5 \cdot 25}{25} = 4{,}24$	$h_2^\circ = \frac{4{,}24 \cdot 38{,}7^2}{4{,}50} = 31{,}8$	$p_2^\circ = 24{,}4 - 2 \cdot 50 \cdot \frac{25^2}{38{,}7^2} = 64{,}5$ *	$L_2' = \frac{2 \cdot 50 \cdot 25}{4{,}24} = 24{,}3$
$\gamma_2' = \frac{31{,}4 + 2{,}5 \cdot 25}{25} = 3{,}75$	$h_2' = \frac{3{,}75 \cdot 32{,}7^2}{4{,}50} = 20{,}0$	$p_2' = 3{,}75 \cdot 20 - 2 \cdot 50 \cdot \frac{20^2}{32{,}7^2} = 37{,}6$	$L_2'' = \frac{2 \cdot 50 \cdot 25}{3{,}75} = 25{,}8$
$\gamma_2'' = \frac{34{,}0 + 2{,}5 \cdot 25}{25} = 3{,}86$	$h_2'' = \frac{3{,}86 \cdot 34{,}0^2}{4{,}50} = 22{,}3$	$p_2'' = 3{,}86 \cdot 22{,}3 - 2 \cdot 50 \cdot \frac{22{,}3^2}{34{,}0^2} = 43{,}0$	$L_2''' = \frac{2 \cdot 50 \cdot 25}{3{,}86} = 25{,}4$
$\gamma_2''' = \frac{33{,}5 + 2{,}5 \cdot 25}{25} = 3{,}84$	$h_2''' = \frac{3{,}84 \cdot 33{,}7^2}{4{,}50} = 21{,}9$	$p_2''' = 3{,}84 \cdot 21{,}9 - 2 \cdot 50 \cdot \frac{21{,}9^2}{33{,}7^2} = 42{,}0$	$L_2^{IV} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 25}{3{,}84} = 25{,}5$

Нулевое приближение

$$L_{18}^\circ = \sqrt{\frac{2K_{18} h_{18}}{\gamma_{18}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \cdot 7{,}1}{2{,}6}} = 16{,}5 \text{ м.}$$

$$l_{экв}^\circ = \frac{2aL_{18}^\circ}{a + 2L_{18}^\circ} = \frac{2 \cdot 72 \cdot 16{,}5}{72 + 2 \cdot 16{,}5} = 22{,}6 \text{ м.}$$

В таблице 4 даны результаты расчета давления в очистном пространстве 1-й восточной лавы.

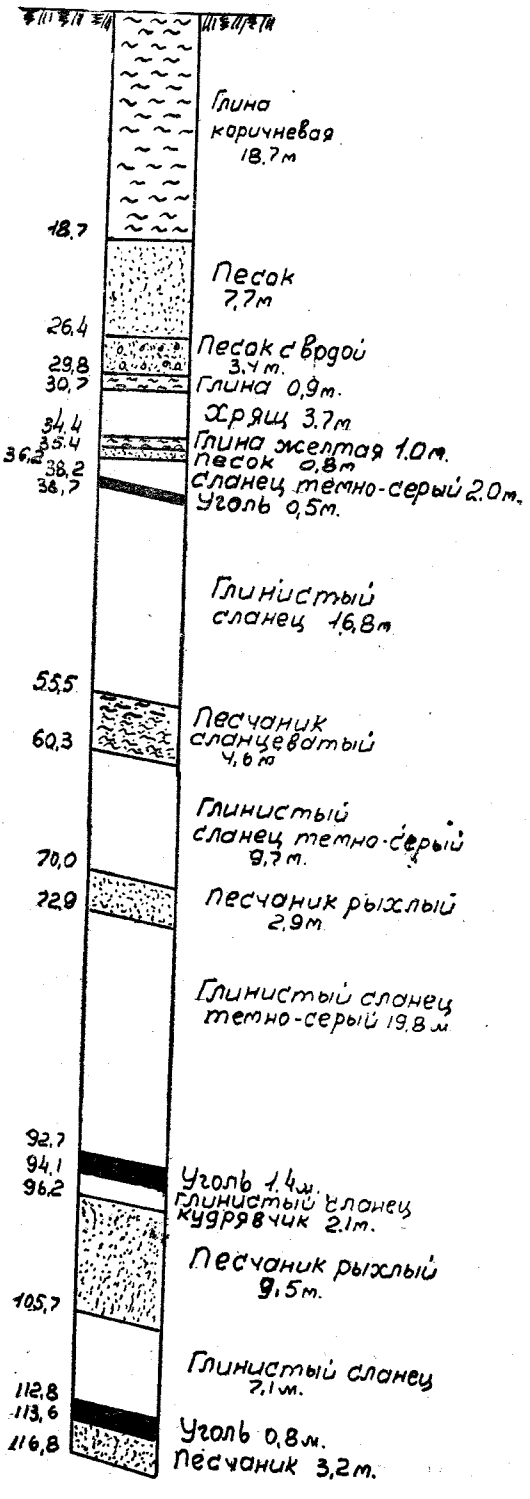

Глина коричневая 18,7м
18,7
Песок 7,7м
26,4
Песок с водой 3,4м.
29,8
Глина 0,9м.
30,7
Хрящ 3,7м
34,4
Глина желтая 1,0м.
35,4
Песок 0,8м
36,2
38,2
Сланец темно-серый 2,0м.
38,7
Уголь 0,5м.
Глинистый сланец 16,8м
55,5
Песчаник сланцеватый 4,8м
60,3
Глинистый сланец темно-серый 9,7м.
70,0
Песчаник рыхлый 2,9м
72,9
Глинистый сланец темно-серый 19,8м
92,7
94,1
Уголь 1,4м.
96,2
Глинистый сланец
Кудрявчик 2,1м.
Песчаник рыхлый 9,5м.
105,7
Глинистый сланец 7,1м.
112,8
113,6
Уголь 0,8м.
116,8
Песчаник 3,2м.

Рис. 9.

Таблица 3

№ п.п.	Название породы	Мощность м	Объемный вес т/м³	Коэффициент крепости	Временное сопротивление сжатию т/м²	Временное сопротивление растяжению т/м²	Расчетн. врем. сопр. растяжению т/м²
1	Глина коричневая	18,7	1,8	1,0	1000	50	17
2	Песок	7,7	2,0	0,7	700	35	12
3	Песок с водой (плывун) . .	3,4	1,6	0,3	300	15	5
4	Глина	0,9	1,8	1,0	1000	50	17
5	Хрящ	3,7	2,0	1,5	1500	75	25
6	Глина зеленая	1,0	1,8	1,0	1000	50	17
7	Песок	0,8	2,0	0,6	600	30	10
8	Глинистый сланец темносерый, липкий	2,0	2,6	3,0	3000	150	50
9	Уголь	0,5	1,3	1,0	1000	50	17
10	Глинистый сланец серый . .	16,8	2,6	4,0	4000	200	67
11	Песчаник сланцеватый . . .	4,8	2,6	3,0	3000	150	50
12	Глинистый сланец темносерый	9,7	2,6	4,0	4000	200	67
13	Песчаник рыхлый	2,9	2,5	3,0	3000	150	50
14	Глинистый сланец темносерый	19,8	2,6	4,0	4000	200	67
15	Уголь	1,4	1,3	1,0	1000	50	17
16	Глинистый сланец кудрявчик	2,1	2,6	3,0	3000	150	50
17	Песчаник рыхлый	9,5	2,5	2,5	2500	125	42
18	Глинистый сланец	7,1	2,6	3,0	3000	150	50

Таблица 4

№ приближения	0	1	2	3	4	5
L_{18} метров	16,5	9,7	13,7	11,5	12,6	12,0
p_{18} т/м²	43,7	8,9	25,8	15,1	20,8	

Замечая, что каждое последующее приближение очень мало отличается от среднего арифметического двух предыдущих, можно считать, что давление в лаве в нашем случае будет равно

$$p_{18} = \frac{15{,}1 + 20{,}8}{2} = 18{,}0 \text{ т/м}^2 = 18000 \text{ кг/м}^2,$$

а рабочее пространство лавы $L_{18} = 12{,}0$ м.

Определяем диаметр стойки по формуле (38)

$$d = \sqrt{m} = \sqrt{75} = 8{,}7 \cong 9 \text{ см}.$$

Определяем необходимую плотность крепления 1-й восточной лавы по формуле (40), принимая запас прочности равным 2:

$$n = \frac{p}{8kd} = \frac{18000}{8 \cdot 140 \cdot 9} = 1{,}78 \cong 1{,}8 \text{ стойки/м}^2.$$

Согласно наблюдениям автора плотность крепления в 1-й восточной лаве равна 1,19 стойки/м²; паспортом крепления для этой лавы предусмотрена плотность 4,35 стойки/м².

Сравнение результатов расчета и данных наблюдений с паспортом крепления показывает, что плотность крепления лавы по паспорту превосходит необходимую по крайней мере в $2^1/_2$ раза.

Литература

1. Бокий О. Б. Резервы для экономии крепежного леса на шахтах Донецкого бассейна. Лес, № 2 и № 3, 1948.
2. Карпов А. М. Опыт работы с обрушением кровли. Сборник материалов по вопросу управления кровлей, ОНТИ НКТП СССР, 1935.
3. Оницик Л. И. Прочность и устойчивость каменных конструкций. Главн. Ред. Строит. Литературы, 1937.
4. Протодьяконов М. М. Крепление горных выработок. Справочник по каменноугольному делу под ред. А. А. Скочинского, изд. Донугля, 1928.
5. Слесарев В. Д. Механика горных пород и рудничное крепление. Углетехиздат Минзападугля, 1948.
6. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов, т. I, Гостехиздат, 1945.
7. Филоненко-Бородич М. М. Сопротивление материалов, 2-е изд. Госстройиздат, 1940.

Ленинград, 1947 г.