Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института, том XXX, вып. I, 1955 г.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Доц. А. А. Борисов

Введение

Задача определения прочных размеров элементов крепи горизонтальных выработок постоянно возникает и в процессе эксплуатации месторождения и при проектировании. Ее правильное решение во многом определяет безопасность, экономичность и бесперебойность работ.

Изучению механизма деформаций и разрушений горных пород посвящен целый ряд работ: М. М. Протодьяконова, П. М. Цимбаревича, В. Д. Слесарева, А. П. Германа, Г. Н. Кузнецова, А. А. Борисова и др.

Разнообразие условий, в которых проходит горная выработка, не позволяет определять нагрузку на крепь в общем случае [1].

Рассмотрим вопрос о давлении кровли на крепь горизонтальной выработки, проведенной в твердых слоистых породах, закрепленной рамной крепью с прямым верхняком.

Слоистые горные породы связаны по контакту, причем связи эти имеют различную прочность. Во многих случаях связь между слоями значительно слабее прочности пород.

Типичной слоистой средой будем называть такую среду, в которой связи между соседними слоями (по контактным поверхностям) достаточно слабы, в идеальном случае — отсутствуют. Наоборот, когда эти связи по контактным поверхностям достаточно прочны, среда уже не является слоистой.

Слоистые породы, залегающие в кровле выработки, будем считать нетрещиноватыми. Вследствие малых пролетов горизонтальных выработок (3—5 *м*) такое допущение вполне обосновано и соответствует данным практики.

Слоистая среда, каждый слой которой является плитой с заделанными краями, представляет многократно статически неопределимую систему, и решение задачи о давлениях этой среды на крепь обычными методами долгое время считалось неосуществимым. Впервые метод решения этой задачи был предложен В. Д. Слесаревым в 1939 г. и назван им методом скользящей выработки [9, 10]. Позднее метод скользящей выработки был применен А. П. Германом [2], Г. Н. Кузнецовым [5] и др.

Предлагаемая работа посвящена дальнейшей разработке и конкретизации рассматриваемых процессов. Приведенное ниже описание процессов деформаций и разрушений пород кровли, разумеется, не исчерпывает вопроса и является в известной мере схематичным.

1. Определение запаса несущей способности пород кровли

Горизонтальные выработки типа штреков имеют большую в сравнении с шириной длину. Кровля таких выработок представляет плиту с заделанными краями. Учитывая большую протяженность выработки сравнительно с шириной, влиянием заделки плиты возле устья и забоя таких выработок можно пренебречь. Если в кровле такой выработки двумя взаимно параллельными плоскостями, перпендикулярными длинной оси выработки, мысленно выделить балку-полоску, то такая балка-полоска будет в известной мере аналогична балке с заделанными концами. Отличие заключается в том, что у реальной балки-полоски, мысленно выделяемой в нетрещиноватой кровле выработки, исключены деформации вдоль оси выработки. Это различие может быть легко учтено введением вместо обычного модуля продольной упругости E приведенного модуля

$$E_1 = \frac{E}{1-\mu^2}, \tag{1}$$

где μ — коэффициент поперечной деформации.

Если же принять во внимание, что по длине выработки, имеющей достаточную протяженность, вероятно наличие трещин, секущих породы кровли поперек ее длинной оси, то необходимость введения приведенного модуля отпадает.

Вопрос об определении полной несущей способности непосредственной кровли (или вообще одного слоя) рассмотрен Г. Н. Кузнецовым [5] для двух типичных случаев загружения кровли: а) равномерно распределенной нагрузкой; б) сосредоточенной нагрузкой.

Для случая равномерно распределенной нагрузки Г. Н. Кузнецов дает следующие формулы:

а) для горизонтального распора

$$T = \frac{ql^2}{8f}, \tag{2}$$

где q — нагрузка, $т/м^2$;
l — пролет выработки;
f — стрела подъема арки;

б) для разрушающей нагрузки

$$q_{разр} = \frac{\sigma_{пч-сж}}{K}\,\frac{h^2 b}{l^2}\left(1-\xi\frac{l}{h}\right), \tag{3}$$

где $\sigma_{пч-сж}$ — предел прочности сжатию;
K — коэффициент концентрации напряжений;
h — мощность слоя;
b — ширина выделенной полоски по оси выработки;
l — пролет выработки;
ξ — безразмерный коэффициент;

в) для запаса несущей способности при жестком защемлении концов балки и K, равном 1, запас несущей способности определяется

$$n_1 = \frac{\sigma_{пч-сж}}{\sigma_{пч-из}}\,\frac{1}{2}\left(1-\xi\frac{l}{h}\right). \tag{4}$$

Соответственно для случая сосредоточенной нагрузки:

а) для горизонтального распора

$$T = \frac{Pl}{4f}; \tag{5}$$

б) для разрушающей нагрузки

$$P_{\text{разр}} = \frac{\sigma_{\text{пч-сж}}}{K} \frac{h^2 b}{2l} \left(1 - \xi \frac{l}{h}\right); \tag{6}$$

в) для запаса несущей способности при жестком защемлении концов балки и при K, равном 1,

$$n_2 = \frac{\sigma_{\text{пч-сж}}}{\sigma_{\text{пч-из}}} \frac{3}{8} \left(1 - \xi \frac{l}{h}\right). \tag{7}$$

Для расчетных целей в формулы, определяющие величину распора, целесообразно ввести не стрелу подъема арки, а опускание среднего шарнира и соответственно преобразовать эти выражения.

Шарниры, образующиеся в непосредственной кровле, располагаются близко к ее плоскостям напластования, вследствие чего опускание среднего шарнира c приближенно может быть определено выражением

$$c = h - f. \tag{8}$$

Тогда

$$T = \frac{Pl}{4(h - c)}. \tag{9}$$

Принимая распределение напряжений в среднем шарнире по треугольнику, получаем следующее выражение для горизонтального распора

$$T = \frac{\sigma_{\text{пч-сж}} F}{2}, \tag{9'}$$

где F — площадь среднего шарнира после образования трещин.

Для разрушающей нагрузки получаем

$$P_{\text{разр}} = 2\sigma_{\text{пч-сж}} F \frac{h - c}{l}. \tag{10}$$

Для момента потери аркой несущей способности значения F, c и h могут быть связаны между собой некоторыми безразмерными коэффициентами a и k:

$$F = ahb, \tag{11}$$

$$c = kh. \tag{12}$$

Подставляя значения F и c из выражений (11) и (12), получим

$$P_{\text{разр}} = 2\sigma_{\text{пч-сж}} a \frac{bh(h - kh)}{l}. \tag{13}$$

Обозначая произведения всех безразмерных коэффициентов η_2 и производя необходимые сокращения, найдем

$$P_{\text{разр}} = \eta_2 \sigma_{\text{пч-сж}} \frac{bh^2}{l}. \tag{14}$$

На основании результатов исследований Г. Н. Кузнецова [5] для талькохлоритового сланца $\eta_2 = 0{,}384$.

Значения разрушающих нагрузок для этого случая, подсчитанные по формуле (14), достаточно хорошо согласуются с опытными данными (рис. 1).

Принимая во внимание, что поперечная деформация кровли по оси выработки так же исключена после образования арки, как и до появления трещин, получим следующее выражение для запаса несущей способности:

$$n_2 = \eta_2 \frac{\sigma_{\text{пч - сж}}}{\sigma_{\text{пч - из}}}. \tag{15}$$

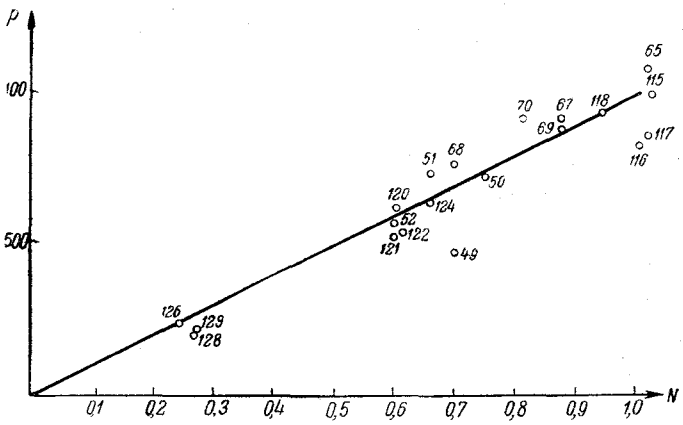


Рис. 1. Сравнение зависимости $P_{\text{разр}} = f(N)$ по формуле (14) и по опытным данным Г. Н. Кузнецова

$$N = \frac{bh^2}{l}$$

Таким образом, запас несущей способности слоя (балки) прямо пропорционален отношению предела прочности данной породы при сжатии к пределу прочности ее при изгибе.

Аналогично для равномерно распределенной нагрузки:

$$T = \frac{ql^2}{8(h-c)}; \tag{16}$$

$$q_{\text{разр}} = \eta_1 \sigma_{\text{пч - сж}} \frac{bh^2}{l^2}, \tag{17}$$

$$n_1 = \eta_{11} \frac{\sigma_{\text{пч - сж}}}{\sigma_{\text{пч - из}}}. \tag{18}$$

Из формул (14) и (17) можно получить выражение для предельных пролетов при потере аркой несущей способности:

а) при сосредоточенной нагрузке и $b = 1$

$$l_{\text{разр}} = \eta_2 \sigma_{\text{пч - сж}} \frac{h^2}{P}; \tag{19}$$

б) при равномерно распределенной нагрузке и $b = 1$

$$l_{\text{разр}} = \sqrt{\eta_1 \frac{\sigma_{\text{пч - сж}} h}{\gamma}}, \tag{20}$$

где γ — объемный вес рассматриваемой породы.

Эти формулы и могут быть использованы при расчетах нагрузок на крепь горизонтальных выработок. Однако практическая ценность их снижается отсутствием учета деформаций ползучести, нарастающих с течением времени в шарнирах арок.

2. Стадиальность процесса деформаций и разрушений непосредственной кровли

Процесс деформации и разрушения пород кровли в общем случае нельзя рассматривать как непрерывный, постепенный. Процесс этот развивается ступенями, имеет ряд стадий.

Момент проходки выработки соответствует относительно быстрому удалению породы в забое, а при взрывных работах — весьма быстрому. Одновременно в породах, окружающих выработку, происходит перераспределение упругих деформаций и напряжений со скоростью, близкой к скорости распространения звука в данной среде.

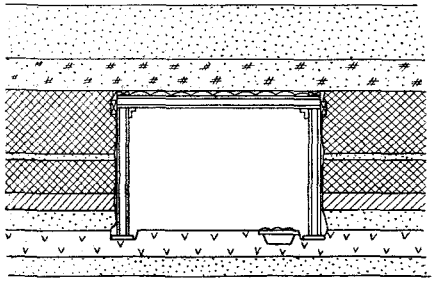


Рис. 2. Схема начальной стадии совместной работы непосредственной кровли и жесткой рамной крепи

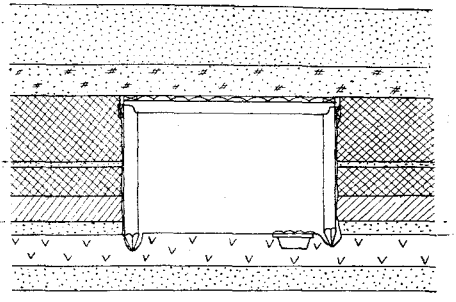


Рис. 3. Схема начальной стадии совместной работы непосредственной кровли и податливой рамной крепи

С этого момента до установки крепи проходит некоторое время, когда в породах кровли начнут развиваться деформации ползучести.

Крепь воспринимает нагрузку постепенно, по мере смятия клиньев, замков у деревянной крепи, лежней у металлической крепи, уплотнения забутовки и т. д., обеспечивающих крепи значительную, хотя и не одинаковую для смежных рам податливость в пределах 5—10 *см* (иногда и более). Применение специальных податливых конструкций крепи обеспечивает, разумеется, значительно бо́льшую податливость.

Начало совместной работы непосредственной кровли и крепи в момент ее установки для жесткой и податливой крепей представлено схематично на рис. 2 и 3.

Идеализируя явление, эти типовые случаи совместной работы непосредственной кровли и крепи можно представить механическими схемами, изображенными для жесткой крепи на рис. 4 и для податливой — на рис. 5.

При достаточной прочности пород кровли и податливости крепи через некоторое время деформации ползучести в указанных породах достигнут некоторой величины, закончится релаксация элементов крепи и ее деформации также достигнут соответствующего значения. С этого момента задача может рассматриваться как псевдостатическая. Схема деформаций непосредственной кровли и верхняка при их совместной работе для данной стадии представлена схематично для жесткой и податливой крепей соответственно на рис. 6 и 7.

Непосредственная кровля, как показано выше, деформируется подобно балке с заделанными концами, а верхняк — подобно балке со свободно опертыми концами. Следовательно, в общем случае нагрузка передается лишь на среднюю часть верхняка. По характеру эту нагрузку с бо́льшим основанием можно отнести к сосредоточенной, чем к равномерно распределенной.

Если бы тем или иным способом была определена нагрузка на непосредственную кровлю, то для расчета систем, представленных на рис. 2 и 3, потребовалось бы знание величин деформаций ползучести породы, которой представлена непосредственная кровля.

Вопросы влияния нагрузки при длительном действии ее на деформации горных пород изучены недостаточно. Известны отдельные работы ВУГИ, Г. Н. Кузнецова и др. Несмотря на немногочисленность и разноречивость результатов этих исследований, на их основании можно сделать вполне определенный вывод: при нагрузках, достигающих 80% от разрушающих, наибольшие из наблюдавшихся деформаций ползучести для глинистых сланцев не превосходили 130% от немедленной деформации. Длительность нагружения при этом не превышала 3—4 месяцев. Деформации ползучести у песчаников при тех же значениях разрушающих нагрузок, естественно, были значительно меньше.

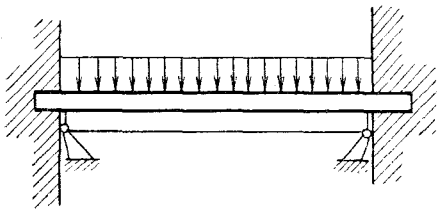


Рис. 4. Механическая схема начальной стадии совместной работы непосредственной кровли и жесткой рамной крепи

Расчеты показывают, что эти деформации ползучести чрезвычайно малы. При пролетах выработки 2,5—3,5 *м* деформации ползучести измеряются миллиметрами. Учитывая наличие податливости крепи, они не могут вызвать значительные ее деформации.

Таким образом, когда несущая способность непосредственной кровли не превзойдена, нельзя ожидать разрушения крепи, так как работу выполняет непосредственная кровля. Очевидно, крепь в этом случае выполняет лишь функции предохранения

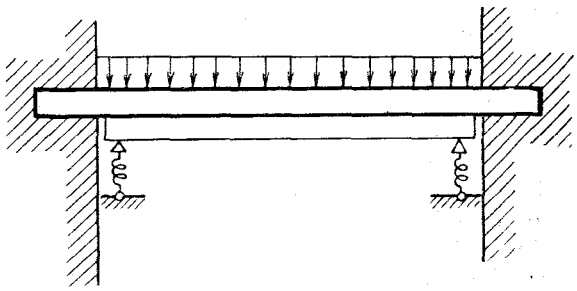


Рис. 5. Механическая схема начальной стадии совместной работы непосредственной кровли и податливой рамной крепи



Рис. 6. Механическая схема деформаций непосредственной кровли и верхняка жесткой рамной крепи в период псевдостатической стадии их совместной работы

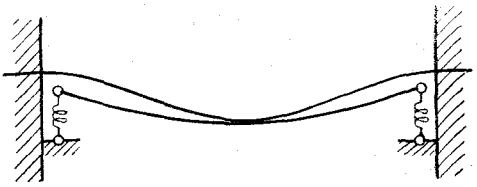


Рис. 7. Механическая схема деформаций непосредственной кровли и податливой рамной крепи в период псевдостатической стадии их совместной работы

против местных вывалов, не закономерных для рассматриваемой кровли.

При достаточно больших пролетах или недостаточной прочности пород кровли после установки крепи, по прошествии некоторого времени, напряжения в опасных сечениях одного или нескольких слоев в кровле выработки могут достигнуть пределов прочности, следствием чего явится трещинообразование.

Как показывают многочисленные опыты, при достаточно больших отношениях пролета к мощности полная несущая способность слоя будет практически превзойдена в момент трещинообразования. Наоборот, при малых отношениях пролета к мощности вместо балки с заделанными краями будут образовываться трехшарнирные арки, которые при определенных условиях могут обладать большей, чем плита, несущей способностью [5].

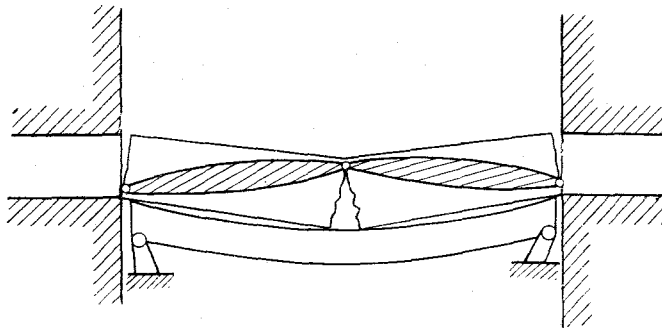


Рис. 8. Механическая схема совместной работы жесткой рамной крепи и непосредственной кровли после образования трехшарнирной арки

Однако чтобы арка, образовавшаяся в непосредственной кровле (рис. 8 и 9), могла нести и собственный вес, и некоторую нагрузку от вышележащих пород, она предварительно должна получить вполне определеное опускание, что ясно из преобразованного выражения (13)

$$P_{\text{разр}} = 2a\sigma_{\text{пч}-\text{сж}} \frac{c(h-c)}{l},$$

где c — опускание арки.

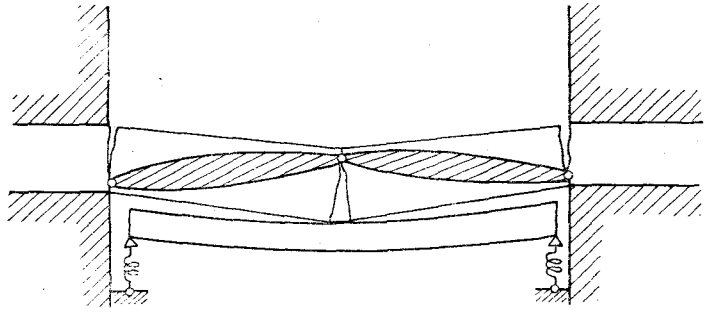


Рис. 9. Механическая схема совместной работы податливой рамной крепи и непосредственной кровли после образования трехшарнирной арки

Пренебрегая членом, содержащим c^2, приближенно получим

$$c = \frac{\gamma l^2}{4a\sigma_{\text{пч}-\text{сж}}}. \qquad (21)$$

Такое опускание среднего шарнира арки возможно благодаря наличию податливости крепи. Если бы крепь была жесткой, опускание среднего шарнира арки оказалось бы невозможным. В этом случае

непосредственная кровля и вышележащие слои, вместо того чтобы принять на себя часть нагрузки после образования трещин, сами являлись бы нагрузкой на крепь.

Опускание среднего шарнира арки не ограничивается первоначальным его опусканием. Под влиянием времени в шарнирах арок будут нарастать деформации ползучести, что вызовет дальнейшее опускание среднего шарнира арок и, следовательно, нарастание деформации крепи.

При определенных соотношениях пролета, мощности и пределов прочности пород нарастание деформаций ползучести практически может прекратиться. Тогда эта новая задача также может рассматриваться как псевдостатическая.

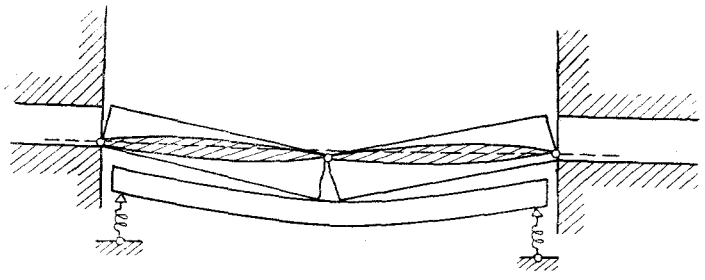


Рис. 10. Схема потери несущей способности трехшарнирной арки, образовавшейся в непосредственной кровле

При недостаточной прочности пород и значительных соотношениях пролетов и мощностей нарастание деформаций ползучести в шарнирах может привести к разрушению арок, т. е. к потере ими несущей способности, особенно потому, что горизонтальный распор T, вызывающий смятие шарниров, быстро возрастает по мере увеличения опускания c. Действительно, для сосредоточенной нагрузки

$$T = \frac{Pl}{4(h-c)},$$

для распределенной нагрузки

$$T = \frac{ql^2}{8(h-c)}.$$

Момент потери несущей способности непосредственной кровлей представлен схематично на рис. 10.

Опускание пород кровли может достигнуть больших значений, вызывая весьма большие деформации крепи, вплоть до ее разрушения, причем разрушения крепи могут происходить в различные моменты, в зависимости от ее податливости и прочности.

В тех случаях, когда несущая способность непосредственной кровли не превзойдена, разрушение крепи не приводит к завалу выработок, а заново возведенная крепь стоит хорошо, не испытывая значительных деформаций. Обрушение кровли и завал выработки неизбежны, если несущая способность непосредственной кровли превзойдена, а прочность крепи недостаточна. Один из таких завалов представлен на рис. 11.



Рис. 11. Завал выработки вследствие потери несущей способности непосредственной кровли и крепи (верхняка)

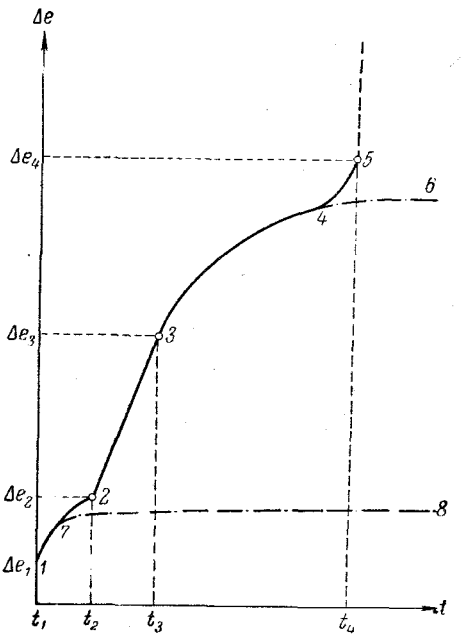


Рис. 12. График деформаций и разрушений непосредственной кровли во времени

Процесс деформаций и разрушений кровли может быть схематично представлен кривой, изображенной на рис. 12,

где Δe — опускание среднего сечения непосредственной кровли;
t — время;
Δe_1 — немедленная деформация кровли;
$\Delta e_1 - \Delta e_2$ — деформации ползучести непосредственной кровли до образования трещин;
t_2 — момент трещинообразования;
$\Delta e_2 - \Delta e_3$ — опускание среднего шарнира арки за счет его раздавливания;
$\Delta e_3 - \Delta e_4$ — деформация ползучести в шарнирах арки и дополнительное раздавливание, вызванное увеличением распора T;
t_3 — момент, когда арка принимает на себя всю или часть нагрузки;
t_4 — момент разрушения арки.

В частных случаях, при достаточной прочности непосредственной кровли нарастание деформаций может ограничиться кривой *1—7—8*. В других условиях, при образовании в непосредственной кровле арки, имеющей достаточный запас несущей способности, нарастание деформации может ограничиться линией *1—2—3—4—6*.

Работа жесткой крепи в периоды различных стадий нагружения схематично представлена на рис. 2, 4, 6, 8. Практически абсолютно жесткой крепи не бывает, крепь всегда имеет некоторую, хотя и небольшую, податливость.

Работа податливой крепи в периоды различных стадий представлена на рис. 3, 5, 7, 9 и 10. В пределах податливости стоек давление на верхняк определяется только этой податливостью, а не величиной давления, которое могут передать породы кровли, за вычетом несомой ими нагрузки.

Только после того, как в течение некоторого времени податливость стоек будет исчерпана, верхняк начнет воспринимать в меру своей прочности нагрузку от пород кровли. Этим обстоятельством и объясняется благоприятная роль податливости стоек крепи.

3. Механизм деформаций и разрушений комплекса пород кровли

Процесс деформаций и разрушений некоторого числа слоев над непосредственной кровлей развивается в общем по тем же стадиям, как и процесс деформаций и разрушений непосредственной кровли. Он зависит от свойств пород, их строения, чередуемости, мощности, имеет свои особенности и отличается многообразием.

Наиболее общим типом строения кровли является случай, когда в кровле выработки залегают перемежающиеся слои пород различных мощностей и различных физико-механических свойств. Простейшим типом строения кровли является случай, когда в кровле выработки залегают тонкослоистые породы одинаковой мощности и одинаковых физико-механических свойств, с отношением пролета выработки к мощности слоя $\frac{l}{h} \sim 10$.

Эти два случая, конечно, не охватывают всего разнообразия строения пород кровли. Рассмотрим механизм деформаций и разрушений для второго, т. е. для простейшего, типа строения пород кровли.

Изучение характера деформаций и разрушений пачки слоев над выработкой было начато еще Файолем [12], который экспериментально

установил факты последовательного, в направлении снизу вверх порядка обрушения слоев и уменьшения пролетов.

Эти исследования на современной научной основе были продолжены Г. Н. Кузнецовым, который указывает следующие причины последовательного уменьшения пролетов слоев в направлении снизу вверх:

а) совместный изгиб слоев с учетом разности кривизны поверхности слоев на границах раздела;

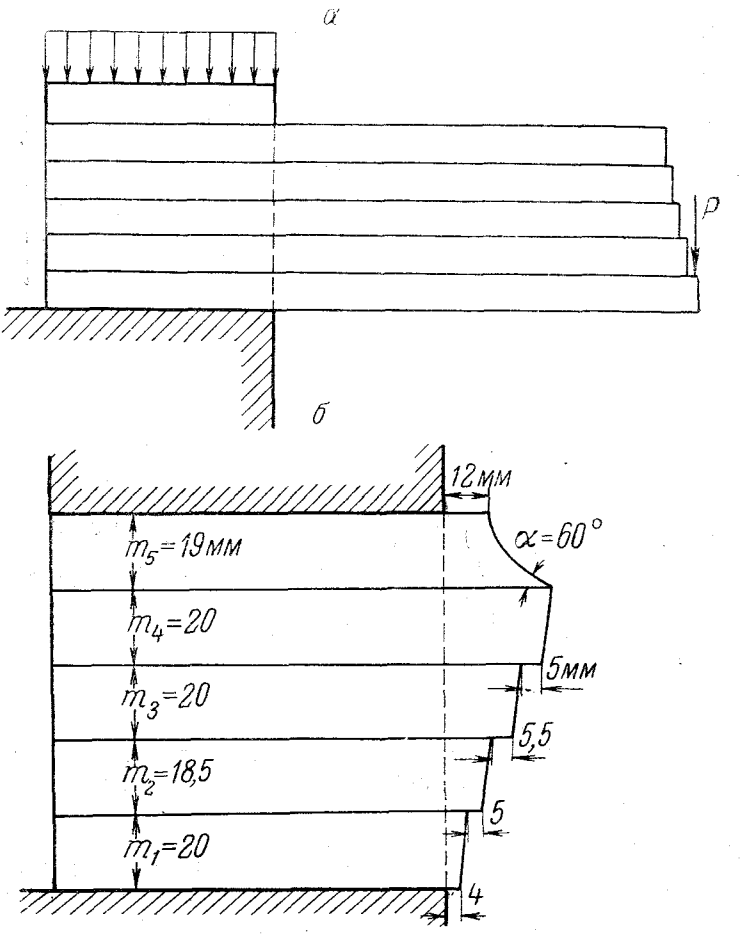


Рис. 13. Схема опытов по излому консольной пачки слоев сосредоточенной нагрузкой, прилагаемой поочередно к каждому слою снизу вверх

б) трение и сцепление между слоями;

в) влияние сил распора.

В 1950 и 1951 гг. нами были проведены опыты по дальнейшему выяснению этого вопроса, описанные в работах: «Давление на крепь горизонтальных выработок в условиях угольных месторождений» (1950 г.) и «Экспериментальное изучение характера деформаций подрабатываемой толщи пород при разработке свиты сближенных крутопадающих пластов с закладкой в восходящем порядке» (1951 г.).

На рис. 13, *а* изображена схема излома пачки слоев. Слои ломались сосредоточенной силой *P* поочередно, в направлении снизу вверх. Слои были примерно одинаковой мощности. Материал принимался различной прочности: а) алебастр; б) алебастр и мелкий кварцевый песок в пропорции 2 : 1; в) алебастр и мелкий кварцевый песок в пропорции 1 : 1. Картина после излома представлена на рис. 13, *б*.

Было проведено 6 экспериментов — по два для каждого материала. Результаты экспериментов почти равнозначны, небольшие отклонения

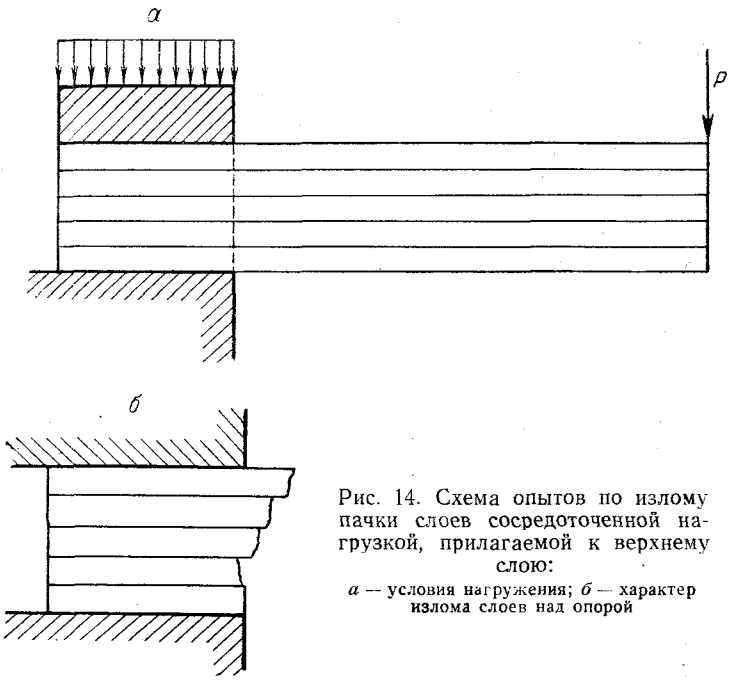


Рис. 14. Схема опытов по излому пачки слоев сосредоточенной нагрузкой, прилагаемой к верхнему слою:
а — условия нагружения; *б* — характер излома слоев над опорой

изломов в ту или другую сторону объясняются наличием местных ослаблений: включениями, микротрещинами, изъянами по краям или поверхности образцов и пр.

На рис. 14, *а* приведена другая схема излома пачки слоев. В этой группе экспериментов сосредоточенная сила прилагалась к концу верхнего слоя. Однако слои изламывались поочередно — от нижнего к верхнему. Материал слоев тот же, что и в предыдущих экспериментах.

Картина после излома слоев представлена на рис. 14, *б*. Результаты экспериментов мало отличались друг от друга, небольшие отклонения объясняются теми же причинами, что и в предыдущем случае. В этой группе проведено 4 эксперимента.

На рис. 15, *а* изображена схема опыта по излому сосредоточенной силой одного слоя, заделанного консольно. На рис. 15, *б* представлен результат излома. Во всех десяти случаях слой ломался по вертикали. Материал применялся тот же, что и в предыдущих опытах.

На рис. 16 приведен характер излома пачки однопролетных балок, защемленных двумя концами, под действием сосредоточенной нагрузки. В опытах применялись балки из алебастра, смеси алебастра с песком (с отношением 1 : 1 и 1 : 2) и талькового сланца. Высота балок колебалась от 20 до 50 *мм*. Излом балок происходил поочередно в направлении снизу вверх.

На рисунке четко видно уменьшение пролета в направлении снизу вверх.

Аналогичная картина, по опытам Г. Н. Кузнецова, имеет место и при разрушении пачки однопролетных балок из эквивалентных материалов под влиянием собственного веса.

Сопоставление проведенных нами опытов и сравнение их с опытами Г. Н. Кузнецова и Файоля приводит к выводу, что основной причиной уменьшения пролета является совместный изгиб пачки слоев и увеличение радиуса изгиба слоев по мере удаления от выработки.

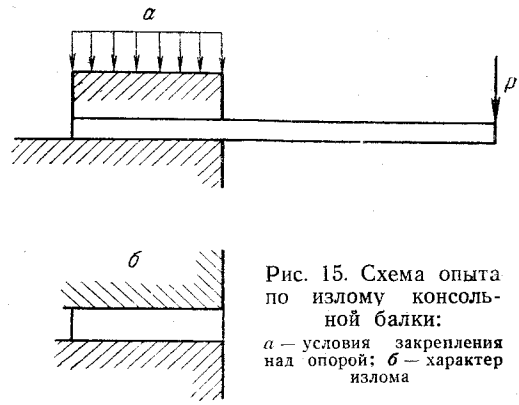


Рис. 15. Схема опыта по излому консольной балки:
а — условия закрепления над опорой; *б* — характер излома

Действительно, предположим, что в кровле выработки с некоторым пролетом l имеется пачка слоев с одинаковыми мощностями m и равными физико-механическими свойствами. Если первый слой, изгибаясь,

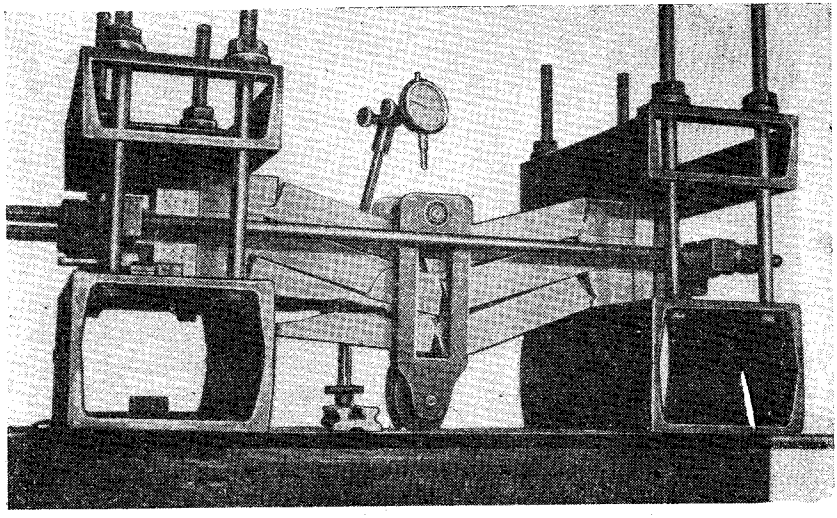


Рис. 16. Характер излома пачки однопролетных балок, защемленных двумя концами

имеет над опорой некоторый радиус кривизны его нейтральной линии ρ, то верхнее волокно этого слоя будет иметь уже радиус кривизны

$$\rho_1 = \rho + \frac{m_1}{2}. \qquad (22)$$

Так как второй слой имеет ту же мощность и те же физико-механические свойства, его нижнее волокно должно иметь над опорой радиус кривизны

$$\rho_2 = \rho - \frac{m_2}{2}. \qquad (23)$$

Но, так как под ним находится верхнее волокно первого слоя с большим радиусом кривизны $\rho_1 = \rho + \frac{m_1}{2}$, то второму слою будет задан больший радиус кривизны, он получит меньший прогиб и ляжет у опоры на первый слой.

Радиус кривизны верхнего волокна второго слоя увеличится по сравнению с радиусом кривизны верхнего волокна первого слоя на величину мощности

$$\rho_3 = \rho_1 + m_2 = \rho + \frac{m_1}{2} + m_2. \qquad (24)$$

Следовательно, если принять третий слой таким же по прочности и мощности, как первый и второй слой, то его нижнее волокно должно было бы иметь радиус кривизны таким же, как и нижнее волокно первого и второго слоев, т. е.

$$\rho_4 = \rho_2 = \rho - \frac{m_2}{2}. \qquad (25)$$

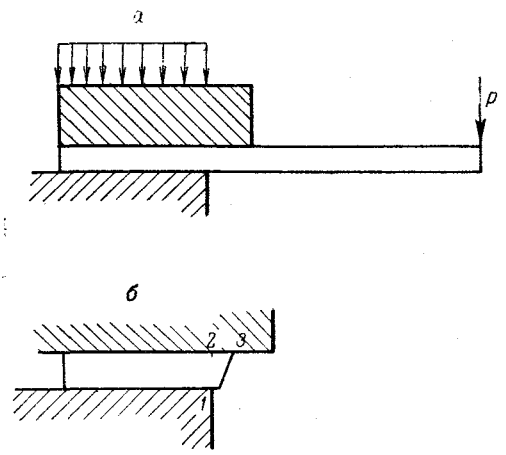


Рис. 17. Схема опытов по излому консольной балки при вынесенной верхней опоре:
а — условия закрепления и нагружения; *б* — характер излома

Но так как под ним находится верхнее волокно второго слоя с радиусом кривизны $\rho_3 > \rho_1$, третий слой получит меньший прогиб и ляжет у опор на второй слой и т. д.

Разумеется, слои, ложась друг на друга, будут передавать друг другу дополнительную нагрузку в местах налегания, что усложнит процесс.

Для выяснения роли трения в местах налегания слоев были проведены опыты по излому одиночных слоев. Схема этих опытов приведена на рис. 17, *а*. Верхняя плита выносилась вперед — в сторону вылета по отношению к нижней опоре. Во всех 15 проведенных опытах образец ломался с некоторым выносом от опоры, плоскость излома была наклонена вперед. Зажим слоя в этом случае происходил не по плоскости *1—2*, а по плоскости *1—3*, как и в случае наличия пачки слоев (рис. 17, *б*). На верхней опоре оставался четкий отпечаток неизломанной части балки над нижней опорой.

Сравнение рис. 17 и 15 свидетельствует о большой роли трения в местах налегания слоев друг на друга — вблизи опор. Трение в этих местах усиливает эффект выноса опор к середине пролета.

Таким образом, основными причинами уменьшения пролетов при прочих равных условиях являются:

1) увеличение радиуса изгиба нижнего волокна каждого следующего слоя по сравнению с предыдущим;

2) трение в местах налегания слоев друг на друга.

Кроме того, следует признать неправильными такие приемы расчета давлений в многослоистой среде для рассматриваемого случая, в которых передача давления от слоя к слою принимается равномерно распределенной по всей длине пролета. Это давление передается лишь на участках налегания слоев друг на друга и неравномерно.

Таким образом, лабораторные исследования, как и данные практики, показывают, что обрушение слоев пород идет поочередно, по

направлению снизу вверх, начиная от непосредственной кровли выработки. Обрушению предшествует расслоение. Пролет каждого следующего (в направлении снизу вверх) слоя уменьшается по сравнению с предыдущим.

Поочередное обрушение слоев будет происходить до тех пор, пока пролет некоторого слоя с учетом ползучести данной породы не окажется меньше пролета разрушения.

Пролет каждого следующего (в направлении снизу вверх) слоя можно выразить через пролет предыдущего, связав их коэффициентом η:

$$l_{n+1} = \eta l_n, \tag{26}$$

где l — пролет слоя;

n — номер слоя;

η — коэффициент уменьшения пролета.

Значение коэффициента уменьшения пролета не имеет пока точного выражения. А. П. Герман [2] предложил следующее значение этого коэффициента:

$$\eta = 0{,}88 = \text{const}. \tag{27}$$

На основании наших опытных данных[1] для отношения пролета к мощности в пределах $\frac{h}{l} = \frac{1}{5} \div \frac{1}{10}$ коэффициент уменьшения пролетов можно приближенно определить выражением

$$\eta = \frac{2l_n - h_{n+1}}{2l_n}, \tag{28}$$

т. е. η меняется от 0,83 до 0,95.

В результате уменьшения пролетов слоев снизу вверх, над выработкой появляется зона пород, разбитых трещинами, ограниченная сверху породой-мостом. Следовательно, в данном случае породой-мостом может явиться не обязательно мощный слой, представленный прочной породой, но при достаточном уменьшении пролета — и слой с относительно малой мощностью и прочностью.

Породы над зоной трещинообразования не находятся в состоянии покоя: они испытывают прогиб, который в течение некоторого времени нарастает вследствие деформаций ползучести.

В связи с тем, что для рассматриваемого типа строения кровли характерны большие отношения пролета к мощности, нельзя ожидать сколько-нибудь значительных запасов несущей способности слоев в пределах зоны трещинообразования. В итоге на крепь в этом случае будет действовать сила, определяющаяся полным весом пород зоны трещинообразования (рис. 18). Механическая схема для этого случая представлена на рис. 19.

Подробный анализ механизма деформаций и разрушений твердых слоистых пород в кровле выработки приводит к выводу о том, что распространенное представление об образовании свода над выработкой являлось первой и притом весьма отдаленной аналогией действительного процесса.

Перейдем к рассмотрению наиболее общего типа строения пород кровли.

При достаточно больших пролетах над выработкой также может возникнуть зона трещинообразования. Однако, в отличие от предыдущего

[1] Случаи высоких балок здесь не рассматриваются.

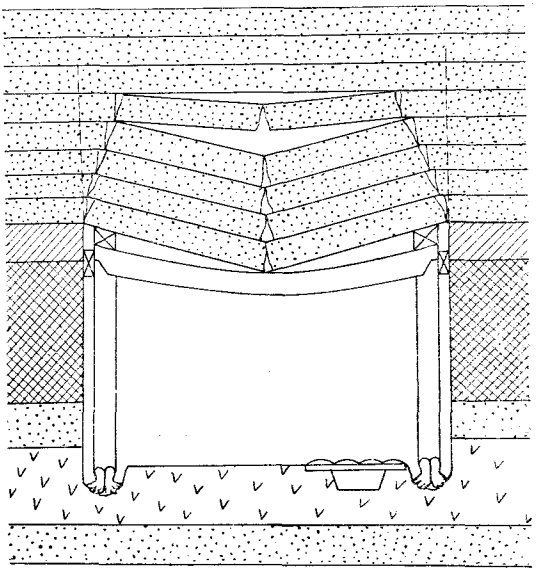


Рис. 18. Схема работы податливой рамной крепи при потере несущей способности части слоев

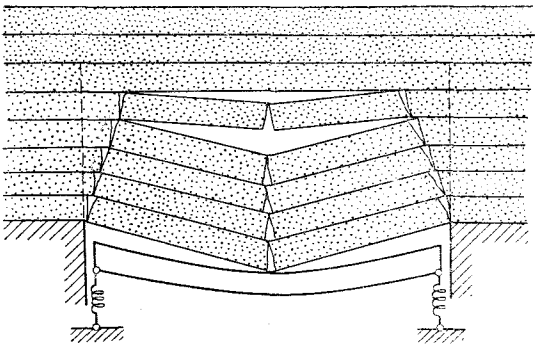


Рис. 19. Механическая схема совместной работы пачки слоев и податливой рамной крепи при потере несущей способности слоев

случая, здесь, в зоне трещинообразования, одни породы могут зависать, образуя арки, другие, наоборот, потеряв несущую способность, могут явиться нагрузкой для первых. Арки, образовавшиеся в пределах зоны трещинообразования над непосредственной кровлей, будут разгружать последнюю, облегчая ее работу.

Как и в предыдущем случае, здесь неизбежно будет происходить уменьшение пролетов слоев и образование породы-моста, однако строгой очередности опускания слоев здесь не происходит. Опускание слоев будет происходить пачками, так как менее прочные слои будут являться нагрузкой для более прочных. Лишь в отдельных участках зоны трещинообразования возможно поочередное опускание слоев. Таким образом, порядок опускания слоев здесь более сложен.

Разумеется, процесс развития деформаций и разрушений пород кровли развивается более разнообразно и зависит от конкретных условий, но изложенное позволяет достаточно четко представить рассматриваемый процесс и для других случаев строения пород кровли.

4. Схема определения нагрузки на верхняк

На основании изложенного выше можно предложить следующую схему определения нагрузки на верхняк.

1. При заданном пролете выработки для каждого слоя поочередно, в направлении снизу вверх, вплоть до породы-моста, определяются: пролет данного слоя, пролет трещинообразования, опускание среднего шарнира и запас несущей способности.

Пролет каждого слоя над непосредственной кровлей определяется по формуле

$$l_{n+1} = \eta_{n+1} l_n, \tag{29}$$

где

$$\eta_1 = 1 - \frac{h_{n+1}}{2l_n};$$

h_{n+1} — мощность рассматриваемого слоя;

l_n — пролет предыдущего слоя.

Отсюда

$$l_{n+1} = \frac{2l_n - h_{n+1}}{2l_n}. \tag{30}$$

Пролет трещинообразования

$$l_{тр} = k \sqrt{\frac{\sigma_{пч-из} h}{\gamma}}, \tag{31}$$

где γ — объемный вес рассматриваемого слоя;

$$k = \varkappa \sqrt{\eta_2};$$

$\varkappa$ — коэффициент, учитывающий нарастание во времени деформаций ползучести. Он может быть определен отношением пролета трещинообразования при длительном действии нагрузки $l_{дл}$ к пролету трещинообразования при кратковременных (обычных) испытаниях $l_{кр}$, т. е.

$$\varkappa = \frac{l_{дл}}{l_{кр}} < 1. \tag{32}$$

В последнее выражение не введен коэффициент, учитывающий невозможность поперечной деформации в направлении вдоль оси выработки.

Опускание среднего шарнира

$$c = \frac{h}{2} - \sqrt{\frac{h^2}{4} - \frac{\gamma h l^2}{4a\sigma_{\text{пч}-\text{сж}}}}$$

или приближенно, пренебрегая членом, содержащим c^2,

$$c = \frac{\gamma l^2}{4a\sigma_{\text{пч}-\text{сж}}}.$$

Запас несущей способности

$$n = \frac{q_{\text{разр}}}{q_{\text{факт}}}.$$

Эти расчеты дают возможность выяснить состояние каждого слоя, находящегося под действием только собственного веса.

2. Для выяснения совместной работы слоев их необходимо объединить в группы, выделив неразбитые трещинами слои, которые будут нагружены залегающими над ними потерявшими несущую способность породами. Затем вести расчет в направлении сверху вниз, начиная от первой породы-моста. Породой-мостом является порода, пролет которой, с учетом нагрузки от вышележащих слоев, меньше пролета трещинообразования.

Пролет трещинообразования для прочных слоев определяется вторично с учетом нагрузки от вышележащих слабых слоев

$$l_{\text{тр}} = k\sqrt{\frac{\sigma_{\text{пч}-\text{из}} h^2}{\sum p_i + \gamma h}}, \tag{33}$$

где $\sum p_i$ — суммарная нагрузка на единицу длины пролета от веса вышележащих пород, потерявших несущую способность:

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i. \tag{34}$$

3. Определить опускание средних шарниров несущих слоев при нагрузке

$$q = \sum_{i=1}^{n} p_i + \gamma h. \tag{35}$$

4. Если после образования трещин опускание среднего шарнира верхнего слоя (или пачки) окажется больше, чем нижнего слоя (или пачки), то следует определить дополнительную нагрузку, передаваемую верхним слоем (пачкой) нижнему слою (пачке), из условия

$$c_{\text{верхн. слоя}} = c_{\text{нижн. слоя}}, \tag{36}$$

затем снова определить запас несущей способности нижнего слоя. Таким образом, расчет доводится до непосредственной кровли, для которой определяется запас несущей способности и опускание среднего шарнира.

Явление ползучести в шарнирах приводит к увеличению опускания c, что вызывает, в свою очередь, увеличение горизонтального распора T и, следовательно, увеличение напряжений в шарнирах, дальнейшее их раздавливание и увеличение опускания c, что снова приводит к увеличению T, и т. д. Такая взаимосвязь приводит к тому, что запасы несущей способности слоев после образования в них трещин сравнительно невелики при значительных отношениях пролета к мощности.

Так, по данным лабораторных исследований Г. Н. Кузнецова [6] для талькового сланца при $\frac{h}{l} = \frac{1}{11} \div \frac{1}{4{,}65}$ запас несущей способности составлял соответственно от 1,2 до 2,5 без учета ползучести. Очевидно, при отношениях $\frac{h}{l} = \frac{1}{10} \div \frac{1}{3}$ запас несущей способности пород кровли, с учетом всех факторов, в том числе и ползучести, не превышает, а во многих случаях оказывается меньше необходимого запаса прочности (2—3).

В этих случаях расчет крепи следует вести на предельную нагрузку, которая определяется полным весом пород зоны трещинообразования.

Таким образом, представляется возможным произвести определение нагрузки на верхняк, принимая ориентировочно те или иные значения для безразмерных коэффициентов $\varkappa$ и a. Однако точное решение вопроса требует знания достоверных значений указанных коэффициентов. В соответствии с этим экспериментальное и теоретическое определение коэффициентов $\varkappa$ и a для различных пород является задачей дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А. А. Давление на крепь горизонтальных выработок. Углетехиздат, 1948.
2. Герман А. П. Свод равновесия и оседания поверхности над горными выработками. Известия АН СССР, ОТН, 1952, № 6.
3. Давидянц В. Т., Козелов Г. Л. Измерения проявлений горного давления на шахтах Донецкого бассейна. Углетехиздат, 1952.
4. Жемочкин Б. Н. Теория упругости. Стройвоенмориздат, 1948.
5. Кузнецов Г. Н. Определение полной несущей способности кровли подземных выработок. Труды ВНИМИ, 1950, сб. XXII.
6. Кузнецов Г. Н. Общие основания к определению условий, допускающих разработку сближенных пластов в восходящем порядке. Труды ВНИМИ, 1949, сб. XIX.
7. Кирпичев В. Л. Сопротивление материалов, 1918.
8. Протодьяконов М. М. Давление горных пород и рудничное крепление, ОНТИ, 1930, ч. 1.
9. Слесарев В. Д. Управление горным давлением при разработке угольных пластов Донецкого бассейна. Углетехиздат, 1952.
10. Слесарев В. Д. Механика горных пород. Углетехиздат, 1948.
11. Цимбаревич П. М. Механика горных пород. Углетехиздат. 1948.
12. Fayol. Note sur les mouvements de terrain, provoqués par l'eseplotation de mines, Bull. de la Soc. de l'ind. miner, 1885.

Поступило
15/III. 1954 г.