Записки Ленинградского орденов Ленина Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLIV, вып. 1, 1961 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДАВЛЕНИЯ СЫПУЧЕЙ ПОРОДЫ НА КРЕПЬ

Е. Я. Махно

Сыпучую породу характеризует следующее: 1) массив сыпучей породы состоит из отдельных, не связанных друг с другом кусков твердой породы; 2) куски породы достаточно малы по сравнению с шириной выработки, что практически исключает возможность сводообразования; 3) форма кусков и их расположение определяют возможность возникновения сил бокового распора путем взаимного расклинивания под действием нагрузки.

Нередко приходится поддерживать выработки под обрушенной породой или закладкой, свойства которых часто близки к сыпучим породам.

Известно много методов определения давления сыпучей породы на крепь, но все они дают результаты, значительно отличающиеся от натурных. Это сводит на нет их практическую ценность и является следствием неправильного представления физико-механического существа явлений, протекающих в давящем объеме породы при работе крепи. Часто в погоне за удобством математического вывода недопустимо упрощается, а иногда и искажается физическая картина явления. Почти все методы рассматривают статическую задачу. Предусматривается, что порода и крепь находятся в неподвижном состоянии. Между тем, как показывает практика, в процессе проходки выработок, установки крепи, а также вследствие податливости крепи приходит в движение расположенная выше порода, в результате чего давление на крепь значительно изменяется. Известно, что в начальный период после установки крепь испытывает сравнительно небольшую нагрузку, которая со временем увеличивается и часто приводит к деформации и поломке крепи.

Поэтому для правильного выбора метода расчета крепи необходимо предварительно установить действительную физико-механическую картину явления и в первую очередь зависимость изменения давления в пространстве и во времени от состояния движения и покоя давящей породы и крепи. Вопросы механики сыпучих пород относятся к одним из наиболее сложных и малоизученных разделов техники. Явления, связанные с давлением на крепь сыпучих пород, отличаются большой изменчивостью протекания, что весьма затрудняет применение аналитического метода решения этой задачи. В данном случае наиболее правильным и реальным следует признать экспериментальный метод изучения указан-

ных вопросов путей моделирования с последующей проверкой полученных результатов в натуре.

С этой целью в лаборатории Ленинградского горного института были проведены экспериментальные работы на моделях [2]. Масштаб моделирования был принят $^1/_{25}$. В качестве сыпучей породы использовали мелкий песок, дробленую каменную соль и щебень с объемным весом соответственно 1,65; 1,3 и 1,7 *кг/дм*^{3} и коэффициентом внутреннего трения 0,6; 0,74 и 0,85. Этот коэффициент определялся замером угла естественного откоса породы [1]. Куски соли и щебня имели размеры от 1—2 до 25—35 *мм*, в основном 5—15 *мм*. Размер площадки (крепи), на которую замерялось давление породы, от 0,1×0,5 до 0,325×0,735 *м*, а высота давящего слоя породы превышала ширину площадки от 3 до 5 раз. Опускание крепи производилось на высоту 0,5—0,8 *см* со скоростью 1,2 *см/мин*.

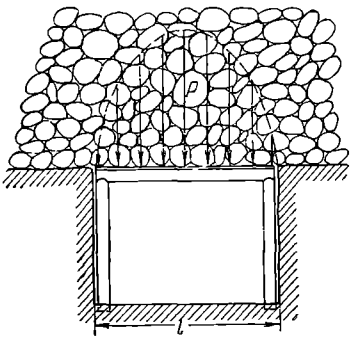


Рис. 1. Расчетная схема давления на крепь

Как показали опыты, при засыпании сыпучей породы на неподвижную жесткую крепь (рис. 1) давление растет по гидростатическому закону (рис. 2, линия *АБ*). При медленном опускании крепи порода приходит в движение и давление резко уменьшается (линия *БВ*). Если затем прекратить опускание крепи, то давление на нее опять начнет повышаться вначале интенсивно, затем все медленнее и через 5—6 дней изменение давления будет незначительным (линия *ВГ*). Причиной уменьшения давления на крепь при ее опускании является возникновение сил трения между кусками перемещающейся породы в результате действия бокового распора. В результате значительная часть веса расположенной выше породы передается на неподвижный массив — по бокам крепи.

Аналогичная картина наблюдается и в шахтных условиях. Наименьшее давление на крепь имеет место сразу после ее установки. С течением времени оно возрастает, и при неправильном выборе паспорта крепь будет деформирована. Это объясняется образованием ослаблений в массиве породы при установке крепи и податливостью крепи, в результате чего расположенная выше порода приходит в движение и давление уменьшается. Затем запас податливости исчерпывается, крепь и ее опоры делаются более жесткими, порода уплотняется, перемещение ее замедляется и начинает возрастать давление на крепь. Этому способствует также снижение коэффициента бокового распора при уплотнении сыпучей породы, что, в свою очередь, влечет уменьшение сил трения между кусками породы и как результат — увеличение давления на крепь [2].

Чем больше запас податливости, тем продолжительнее период работы крепи с малой нагрузкой. Во время опытов площадка (крепь), воспринимающая давление пород, была укреплена весьма жестко. В шахтных же условиях крепь и ее опоры всегда будут несколько более податливы, что еще больше замедлит нарастание давления.

Пользуясь методом моделирования, можно изучить закономерность изменения нагрузки на крепь в зависимости от основных факторов: нахождения крепи в движении (податливая) или покое (жесткая крепь), ширины выработки, физико-механических свойств пород и др. На основе этих параметров можно установить метод определения величины давления сыпучей породы на крепь.

Возможность увеличения давления до полного веса столба породы в шахтных условиях исключается, поэтому практическое значение имеет только определение минимальной величины давления при перемещении

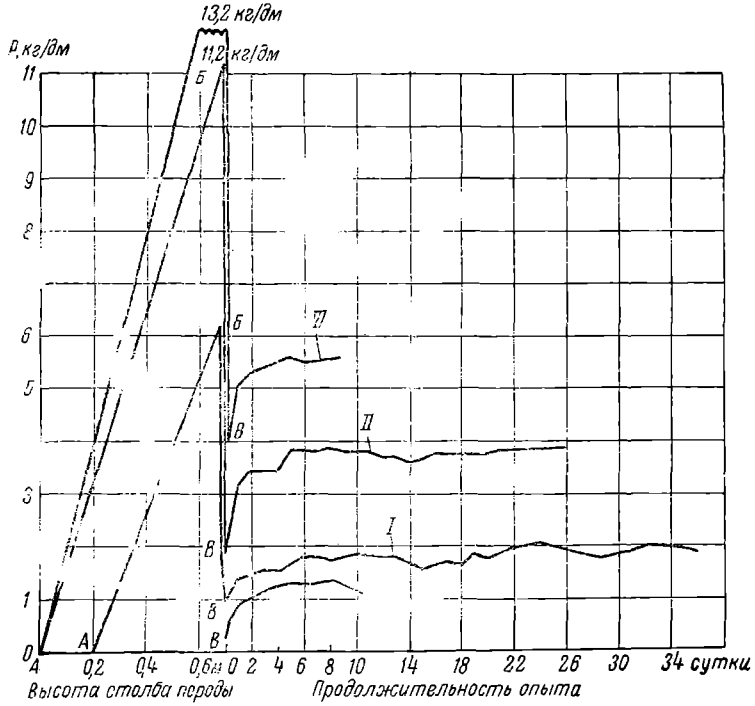


Рис. 2. Графики изменения давления на крепи при моделировании различных стадий работы:
I — соль, $l = 255$ *мм*; *II* — соль, $l = 204$ *мм*; *III* — песок, $l = 204$ *мм*; *IV* — щебень, $l = 102$ *мм*

породы и максимальной при состоянии покоя (см. рис. 2, пункты *В* и *Г*). В табл. 1 приведены минимальные и максимальные значения давления, замеренные при моделировании.

Таблица 1

Порода	l, *мм*	Замеренное давление, *кг/дм*: при опускании крепи P_{min}	Замеренное давление, *кг/дм*: при остановке крепи P_{max}	γl^3 *кг/дм*	$\frac{P_{min}}{\gamma l^2} = k$	$\frac{P_{max}}{\gamma l^3} = k$	$\frac{0{,}33\gamma l^2}{f}$, *кг/дм*	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			По данным ЛГИ					
Песок	100	0,62	—	1,65	0,38	—	0,93	$f = 0{,}6$;
То же	102	0,76	1,42	1,72	0,44	0,83	0,96	$\gamma =$
	155	1,64	—	3,96	0,41	—	3,2	$=1{,}65$ *кг/дм*^{3}
	204	—	5,60	6,85	—	0,82	3,8	
	204	2,71	5,40	6,85	0,40	0,79	3,8	
Среднее		—	—	—	0,41	0,81	—	

Порода	l, *мм*	Замеренное давление, *кг/дм*		γl^2, *кг/дм*	$\frac{P_{min}}{\gamma l^2}=k$	$\frac{P_{max}}{\gamma l^2}=k$	$\frac{0{,}33\gamma l^2}{f}$, *кг/дм*	Примечание
		при опускании крепи P_{min}	при остановке крепи P_{max}					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дробленая каменная соль	100	0,32		1,30	0,25	—	0,59	f=0,74;
То же	155	0,71	—	3,12	0,23	—	1,4	γ=1,28—
	155	0,78	2,00	3,12	0,25	0,64	1,4	1,3 *кг/дм*³
	155	1,00	2,05	3,12	0,32	0,66	1,4	
	204	1,35	—	5,40	0,25	—	2,4	
	204	1,84	3,85	5,40	0,34	0,71	2,4	
	255	2,16	—	8,45	0,26	—	3,7	
	325	3,70		13,70	0,27	—	6,3	
Среднее		—		—	0,27	0,67	—	
Щебень	102	0,34	1,30	1,77	0,19	0,73	0,7	f=0,85;
То же	155	0,96	2,72	4,08	0,23	0,67	1,6	γ =
	204	1,38	4,48	7,08	0,19	0,63	2,8	=1,7 *кг/дм*³
	255	2,47	—	11,00	0,22	—	4,3	
Среднее		—		—	0,21	0,68	—	
По данным Е. Энгессера [3]								
Песок	22	0,026	—	0,073	0,36		0,033	f=0,74;
То же	40	0,075		0,240	0,31		0,108	γ =
Среднее		—		—	0,34	—	—	=1,5 *кг/дм*³

Физически величина давления на крепь представляет собой составляющую веса давящего объема породы и сил внутреннего трения, порожденных боковым распором. Следовательно, величина давления сыпучей породы на крепь в каждом отдельном случае будет определяться тремя факторами — весом давящего объема породы, боковым распором и внутренним трением. Очевидно, давление P на крепь будет возрастать с увеличением веса давящего объема породы, зависящего от ширины выработки l и объемного веса породы γ, и будет уменьшаться с увеличением коэффициентов бокового распора ξ и внутреннего трения f.

Рассмотрим влияние изменения отдельных факторов на величину давления. Анализируя данные табл. 2, отмечаем известную еще с прошлого столетия закономерность: при прочих равных условиях отношение величин давления на 1 *пог. м* выработки соответствует отношению квадратов ширины выработки. Эта закономерность справедлива как для минимального, так и для максимального значений давления (см. табл. 2, графы 4, 5). Изменение остальных факторов находится в более сложной зависимости. Так, например, наблюдаемое при перемещении уменьшение объемного веса породы за счет большей степени разрыхления влечет уменьшение коэффициента внутреннего трения f и одновременно увеличение коэффициента бокового распора ξ. Определить с достаточной точностью зависимость изменения величины давления от изменения значений γ, f и ξ для одной и той же породы практически невозможно.

Таблица

Порода	l_1 и l_2, *мм*	$\frac{l_1^2}{l_2^2}$	Отношение величин давления, соответствующее ширине l_1 и l_2		$\frac{P_1}{c}$	$\frac{P_2}{c}$
			при опускании крепи P_1	при остановке крепи P_2		
1	2	3	4	5	6	7
По данным ЛГИ						
Песок	155 и 100	2,4	2,64		1,10	
То же	204 и 100	4,16	4,36	—	1,04	—
	204 и 102	4,01	3,56	3,88	0,89	0,97
	204 и 155	1,74	1,65	—	0,95	—
Среднее	—	—	—		1,00	0,97
Дробленая каменная соль	155 и 100	2,40	2,59		1,03	
То же	204 и 100	4,16	5,00		1,20	
	255 и 100	6,45	6,64		1,03	
	325 и 100	10,60	11,56	—	1,09	—
	204 и 155	1,74	1,93	1,90	1,11	1,09
	255 и 155	2,7	2,60	—	0,97	—
	325 и 155	4,4	4,46		1,10	—
Среднее	—	—	—		1,08	1,09
Щебень	155 и 102	2,30	2,82	2,10	1,22	0,91
То же	204 и 102	4,01	4,06	3,44	1,01	0,86
	255 и 102	6,20	7,26	—	1,17	—
	204 и 155	1,74	1,40	1,65	0,81	0,95
	255 и 155	2,70	2,58	—	0,96	—
Среднее	—	—	—		1,03	0,91
По данным Е. Энгессера [3]						
Песок	40 и 22	3,30	2,88		0,87	

Таким образом, физическое выражение величины давления сыпучей породы на крепь может быть выражено формулой

$$P = \frac{k_0 \gamma l^2}{f \xi}, \quad m/м, \tag{1}$$

где k_0 — коэффициент, определяющий степень взаимного влияния основных факторов.

По этой формуле могут быть легко определены с допустимым приближением лишь γ и l. Определение же остальных членов и особенно ξ представляет большие трудности, что умаляет практическую ценность формулы (1).

Внутреннее трение сыпучей породы зависит от формы, взаимного расположения и состояния поверхностей отдельных кусков. Как известно, трение движения значительно меньше трения покоя. При медленном перемещении породы отдельные куски могут перекатываться друг по другу и трение скольжения будет переходить в трение качения и обратно. Поэтому при работе крепи коэффициент внутреннего трения сыпучей породы будет непрерывно меняться в пространстве и во времени. Еще более изменчивый характер имеет работа сил бокового распора.

Определение значений k_0, f и ξ возможно только экспериментальным способом, поэтому было бы значительно проще определять их совместно, обозначив влияние их на величину давления коэффициентом

$$k = \frac{k_0}{f\xi}, \qquad (2)$$

Для наиболее распространенных пород значение коэффициента k нетрудно определить на моделях, учитывая линейную закономерность подобия сыпучих материалов. Кроме существенного облегчения работы, совместное определение значений k_0, f и ξ повысит и точность расчета, так как в этом случае исключатся погрешности, связанные с большим числом опытов при определении каждой из величин порознь. Еще одно преимущество такого метода заключается в упрощении расчетной формулы (1), которая примет вид

$$P = k\gamma l^2, \qquad (3)$$

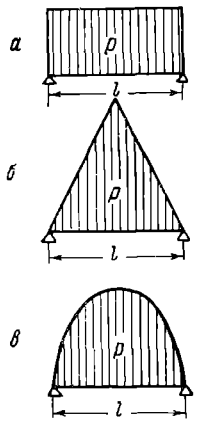


Рис. 3. Эпюры давления

где P — давление сыпучей породы на 1 *пог. м* выработки, *т/м*;
k — коэффициент, соответствующий выражению (2) и определяемый опытно;
γ — объемный вес сыпучей породы, *кг/дм*^{3};
l — ширина выработки, *м*.

В табл. 1 приведены значения k для песка, каменной соли и щебня, соответствующие минимальному (графа 6) и максимальному (графа 7) давлением на крепь. Указанные породы по степени подвижности соответствуют наиболее характерным в горной практике сыпучим породам (f от 0,6 до 0,85), поэтому данными табл. 1 можно пользоваться для приближенных расчетов. В дальнейшем следует продолжить исследования на моделях, определив значение f и для менее подвижных пород с f от 1,0 до 1,2.

Значение k, как видно из табл. 1, уменьшается со снижением подвижности пород. Причем это уменьшение k значительно для минимального давления (графа 6) и несущественно для максимального давления, а для пород с f от 0,74 до 0,85 даже постоянно (см. графу 7). Последнее обстоятельство весьма важно, так как позволяет предположить, что при определении максимальной величины давления для пород с коэффициентом внутреннего трения от 0,7 до 0,85 значение k может быть принято постоянным и равным 0,7

В графе 8 табл. 1 даны значения давления, вычисленные по известной формуле М. М. Протодьяконова [3]. Сравнивая их с замеренными и вычисленными по формуле (3), отмечаем, что по формуле М. М. Протодьяконова величины давления в 1,35—2 раза больше минимальных (графа 3) и в 1,5—1,9 раза меньше максимальных значений (графа 4).

При расчете крепи, кроме величины давления пород, необходимо знать и распределение давления по длине верхняка. Специально поставленные опыты на модели показали, что эпюра давления очерчена сверху кривой с неправильной и изменчивой формой. Указанное подтверждается и опытами НИГРИ [4]. Следовательно, по величине изгибающего момента M эпюра давления будет занимать промежуточное значение между прямоугольной и треугольной эпюрами (рис. 3, *а* и *б*). Поэтому

с допустимой погрешностью (ошибка не превысит 10—15%) можно величину изгибающего момента вычислить по формуле (рис. 3, *в*)

$$M = \frac{Pl}{7}, \ т/м. \tag{4}$$

По формулам (3) и (4) определяется требуемое сечение верхняка крепи. Так, например, диаметр круглого деревянного верхняка

$$d = \sqrt[3]{\frac{Pl}{0{,}7n\sigma}}, \ м, \tag{5}$$

где d — искомый диаметр верхняка, *м*;

n — число верхняков на 1 *пог. м* выработки;

σ — допустимое сопротивление верхняка на изгиб, $т/м^2$. Для сосны $\sigma = 1500$ $т/м^2$ при $d > 0{,}16$ *м*.

Пример. Требуется определить величину давления закладки на крепь слоевого штрека шириной 3 *м*.

Величина давления закладки на крепь по формуле (3) при

$$\gamma = 1{,}7 \ т/м^3 \text{ и } f = 0{,}8$$

$$P = k\gamma l^2 = 0{,}7 \quad 1{,}7 \quad 3^2 = 10{,}7 \ т/м.$$

При деревянном креплении штрека требуемый диаметр верхняка по формуле (5), учитывая $n = 2$ и $\sigma = 1500$ $т/м^2$,

$$d = \sqrt[3]{\frac{Pl}{0{,}7n\sigma}} = \frac{10{,}7 \quad 3}{0{,}7 \cdot 2 \quad 1500} = 0{,}25 \ м.$$

Как указано выше величина давления сыпучей породы на крепь непрерывно меняется. По данным опытов, величина изменения может достигать 30—40% среднего значения. В этих условиях возможны только приближенные методы расчета крепи. Поэтому предлагаемый экспериментальный метод следует также рассматривать в качестве приближенного метода расчета крепи, точность которого вполне допустима для обычных условий практики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цитович Н. А. Механика грунтов. Госстройиздат, 1951.
2. Махно Е. Я. Вопросы разработки крутопадающих пластов угля с применением щитовой крепи. Углетехиздат, 1957.
3. Протодьяконов М. М. Давление горных пород и рудничное крепление. Гостехиздат, 1933.
4. Ривкин В. Д. и Запольский В. П. Давление обрушенных пород на рудный массив. «Горный журнал», 1952, № 3.