Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXI, вып. 1, 1972 г.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СЫПУЧИХ ПОРОД С ПЕРЕДВИЖНЫМИ КРЕПЯМИ В УСЛОВИЯХ РАЗРАБОТКИ КРУТОПАДАЮЩИХ ПЛАСТОВ

Г. И. Швецов

При разработке тонких и средней мощности крутопадающих пластов системами с длинными очистными забоями по падению наиболее трудоемким и тяжелым является крепление призабойного пространства, которое занимает до 55—60% рабочего времени.

В СССР неоднократно предпринимались и предпринимаются попытки усовершенствовать технологию выемки угля при этих системах, заменяя индивидуальную стоечную крепь передвижной, которая перемещается за очистным забоем по мере отработки пласта. В Донбассе проходят промышленные испытания механизированные крепи оградительно-поддерживающего типа «Днепр» и КГД, а также комплекс КДЗ для диагонального забоя. Продолжается усовершенствование технологии очистной выемки механизированным комплексом КБС, составная часть которого — сеточное ограждение. Проектируются и испытываются другие типы крепей, обеспечивающие добычу угля без нахождения людей в призабойном пространстве.

Механизированные крепи для длинных очистных забоев на крутых пластах под влиянием собственного веса и воздействия закладочного массива сползают по падению пласта. В этом трудность создания надежных крепей.

В технической литературе опубликован ряд результатов экспериментальных исследований по установлению характера движения сыпучих пород и по выявлению закономерностей формирования нагрузок на механизированные крепи [1, 2], что позволило дать приближенные методы расчета давлений. Известные расчетные схемы для подпорных стен нельзя распространить на расчет крепей, нагруженных сыпучими породами, так как при небольшой по сравнению с длиной очистного забоя мощности пласта сыпучий массив нельзя рассматривать бесконечно длинным. Из-за наличия дополнительных условий трения сыпучих пород о вмещающие породы пласта нагрузки на крепь необходимо определять из условий пространственной задачи.

Определение давления сыпучих пород на передвижные механизированные крепи в точном решении сопряжено с большими трудностями, которые объясняются чрезвычайной сложностью статически неопределимой задачи о распределении напряжений внутри массива и на поверхностях его соприкосновения с другими телами. Решение

усложняется крайней неопределенностью тех физических факторов, от которых зависит напряженное состояние сыпучего тела. Достаточно указать, что в общем случае сыпучий материал состоит из частиц, имеющих различную величину и форму, различную твердость и шероховатость. Между частицами действуют силы трения, которые меняются в широких пределах в зависимости от степени влажности массива. Кроме сил трения действуют еще более неопределенные силы прилипания (сцепления). Способ и последовательность формирования сыпучего материала за крепью, случайные или систематические сотрясения среды, малейшие осадки и перемещения крепи под влиянием собственного веса или внешнего давления в свою очередь вызывают значительные изменения величины и направления давления. Более сложная, чем в твердых телах, связь между напряжениями и деформациями, специфические особенности физических свойств сыпучего материала, влияние формирующегося за крепью разрыхленного массива на его напряженное состояние — все это затрудняет решение задачи обычными методами строительной механики и требует вводить некоторые допущения, степень достоверности которых и определяет надежность получаемых результатов.

В основу приведенных в статье расчетов положены следующие допущения и предпосылки.

1. Массив обрушенных пород или закладки в выработанном пространстве рассматривается как изотропная и однородная сыпучая среда.

2. Формой разрушения системы, состоящей из ограждающей крепи и прилегающего разрыхленного массива, является смещение крепи в направлении давления с одновременным сползанием какой-то части сыпучего тела в виде призмы обрушения, отделившейся от остального неподвижного массива.

3. Действительная поверхность скольжения призмы обрушения заменяется плоскостью, проходящей через основание крепи, направленной под известным углом к горизонтальной поверхности.

4. Плоскость скольжения располагается нормально к вмещающим породам, а вертикальное давление, действующее на единицу поверхности некоторого горизонтального слоя, выделенного в призме обрушения, равномерно распределено.

5. При сжатии сыпучих тел без возможности бокового расширения всякое приращение интенсивности давления на сыпучее тело в одном направлении вызывает пропорциональное увеличение давления самого тела на жесткие и неподвижные боковые стенки в перпендикулярном направлении. Отношения бокового давления, действующего на кровлю пласта $\sigma_к$, к вертикальному q являются постоянными и не зависящими от глубины под поверхностью засыпки и выражаются известной закономерностью

$$\sigma_к = \zeta_с q, \qquad (1)$$

где $\zeta_с$ — коэффициент бокового распора сыпучей породы вблизи боковых стенок — вмещающих пород пласта.

Висячий и лежачий бока пласта по существу представляют собой абсолютно жесткие боковые стенки, а сдвижение пород кровли в сторону выработанного пространства исключает перемещение сыпучего материала с возникновением плоскостей скольжения, что дает основание воспользоваться приведенной выше зависимостью.

6. Система рассматривается в состоянии предельного равновесия. Это позволяет допустить, что силы трения на поверхностях внешних внутренних сдвигов развиваются в полную силу.

7 Горное давление от сдвигающихся в выработанное пространство пород кровли не учитывается.

Принятые допущения значительно упрощают расчеты и не идут за счет пренебрежения наиболее важными факторами.

Схема расчета давления приведена на рис. 1.

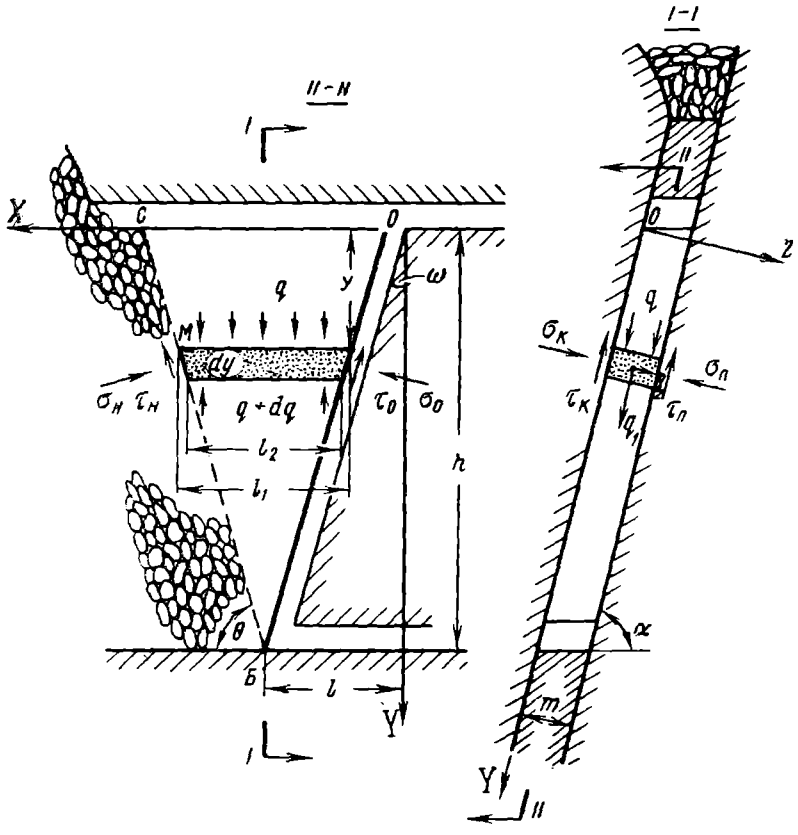


Рис. Схема расчета давления сыпучих пород на крепь

Пласт мощностью m с углом падения α отрабатывается длинными столбами по простиранию с закладкой выработанного пространства под защитой передвижной механизированной крепи *ОБ*, монтируемой по всей длине лавы. Линия очистного забоя отклонена от вертикали на угол ω, что представляет собой общий случай расположения крепи, которая испытывает нагрузки от воздействия призмы обрушения *ОБС* сползающей по плоскости *БС*, направленной под некоторым углом θ к горизонтальной поверхности. Объем призмы обрушения определяется мощностью пласта, наклонной высотой этажа h, положением крепи и направлением опасной плоскости скольжения.

Выделим в призме на глубине y от поверхности сыпучего массива слой бесконечно малой толщины dy, который будет находиться под действием нагрузки сверху q и реактивного давления снизу $q+dq$, собственного веса выделенного элементарного слоя, нормальных и ка-

сательных напряжений, приведенных на рис. 1. Поскольку система крепь — сыпучая порода — висячий и лежачий бока пласта рассматривается в состоянии предельного равновесия, то касательные напряжения на внутренней поверхности крепи τ_0, неподвижной части сыпучего массива $\tau_н$, со стороны кровли $\tau_к$ и почвы $\tau_п$ можно выразить через соответствующие нормальные напряжения следующим образом:

$$\tau_0 = f_0\sigma_0; \qquad \tau_н = f\sigma_н; \qquad \tau_к = f_c\sigma_к; \qquad \tau_п = f_c\sigma_п, \tag{2}$$

где f — коэффициент внутреннего трения сыпучей породы; f_0 и f_c — коэффициенты трения сыпучей породы соответственно о крепь и о вмещающие породы.

Проведем систему прямоугольных координат XYZ и все действующие силы спроектируем на соответствующие координатные оси.

Из условия $\Sigma X=0$ найдем

$$\sigma_н = \mu_н\sigma_0, \tag{3}$$

где

$$\mu_н = \frac{1 - f_0 \operatorname{tg}\omega}{1 - \frac{f}{\operatorname{tg}\theta}}, \tag{4}$$

а из условия $\Sigma Z=0$ получим

$$\sigma_п = \sigma_к + \gamma m \cos\alpha. \tag{5}$$

Из условия $\Sigma Y=0$ с учетом выражений (3) и (5) получим

$$\frac{dq}{dy} = \gamma A - \frac{B\sigma_0}{B_0(h-y)} + \frac{q}{h-y} - 2\frac{f_c\sigma_к}{m}. \tag{6}$$

Здесь

$$A = \sin\alpha - f_c\cos\alpha; \tag{7}$$

$$B = f_0 + \operatorname{tg}\omega + \frac{1 + f\operatorname{tg}\theta}{\operatorname{tg}\theta - f}(1 - f_0\operatorname{tg}\omega); \tag{8}$$

$$B_0 = \operatorname{tg}\omega + \frac{1}{\operatorname{tg}\theta} \tag{9}$$

где γ — объемный вес сыпучей породы, $т/м^3$.

Сумма моментов сил ($\Sigma M=0$) относительно точки M даст второе дифференциальное уравнение

$$\frac{dq}{dy} = \gamma A - \frac{2\sigma_0(f_0 + \operatorname{tg}\omega)}{B_0(h-y)} - 2\frac{f_c\sigma_к}{m}. \tag{10}$$

Совместное решение уравнений (6) и (10) даст

$$\sigma_0 = nq, \tag{11}$$

где

$$n = \frac{\operatorname{tg}\omega + \frac{1}{\operatorname{tg}\theta}}{B - 2(f_0 + \operatorname{tg}\omega)}. \tag{12}$$

Решая совместно выражения (10) и (11), получим дифференциальное уравнение равновесия выделенной элементарной площадки

$$\frac{dq}{dy} = \gamma A - \frac{kq}{h-y} - 2\frac{f_c\sigma_к}{m}, \tag{13}$$

где k — коэффициент зависания сыпучей породы (из-за трения о крепь и неподвижную часть массива),

$$k = \frac{1}{\frac{B}{2(f_0 + \operatorname{tg}\omega)} - 1} \qquad (14)$$

При работе с закладкой выработанного пространства призма обрушения на своей поверхности не несет дополнительной нагрузки. Тогда из условия, что при $y=0$ давление $q=0$, после интегрирования уравнения (13) с учетом выражения (1) получим формулу для расчета интенсивности вертикального давления

$$q = \frac{\gamma A h}{2\frac{\zeta_c f_c}{m} h + \frac{1-k}{\left(1-\frac{y}{h}\right)^k - \left(1-\frac{y}{h}\right)}} \qquad (15)$$

На основе формулы (11) величина нормального напряжения на крепь

$$\sigma_0 = \frac{\gamma A h n}{2\frac{\zeta_c f_c}{m} h + \frac{1-k}{\left(1-\frac{y}{h}\right)^k - \left(1-\frac{y}{h}\right)}} \qquad (16)$$

При известном значении q нормальное напряжение $\sigma_к$ определится по формуле (1), а при найденных значениях σ_0 и $\sigma_к$ напряжения $\sigma_н$ и $\sigma_п$ соответственно определятся из выражений (3) и (5). Для определения касательных напряжений τ_0, $\tau_н$, $\tau_к$ и $\tau_п$ мы располагаем уравнениями (2). Полные напряжения представляют собой равнодействующие нормальных и касательных напряжений, тогда

$$\begin{aligned} \sigma_{0\ \text{полн}} &= \sqrt{\sigma_0^2 + \tau_0^2}; \\ \sigma_{\text{полн}} &= \sqrt{\sigma_н^2 + \tau_н^2}; \\ \sigma_{к.\ \text{полн}} &= \sqrt{\sigma_к^2 + \tau_к^2}; \\ \sigma_{п.\ \text{полн}} &= \sqrt{\sigma_п^2 + \tau_н^2}. \end{aligned} \qquad (17)$$

Величина коэффициента бокового распора сыпучей породы определится по известной формуле

$$\zeta_c = \frac{1}{1 + 2f^2 + 2\sqrt{(1+f^2)(f^2 - f_c^2)}}. \qquad (18)$$

Выражение (16) отличается универсальностью, так как позволяет рассчитать давление для любых условий работы крепи. При $f_c = 0$ формула приводится к плоской задаче.

Исследование уравнения (16) показывает, что давление по длине крепи может распределяться по трем законам: по треугольнику, по экспоненциальной кривой и по параболе (рис. 2).

По треугольной эпюре *1* давление распределяется только в предельном частном случае, когда линия очистного забоя вертикальная ($\omega=0$) и внутренняя поверхность крепи абсолютно гладкая ($f_0=0$), а сыпучий массив находится в плоском напряженном состоянии ($f_c=0$).

В пространственной задаче ($f_c \neq 0$) для прочих аналогичных условий давление по длине крепи распределяется по экспоненциальной кривой. От нуля на поверхности сыпучей породы нагрузка с глубиной возрастает, причем приращение давления асимптотически уменьшается, и с некоторой глубины давление на крепь устанавливается

постоянным. Как следует из эпюр *2* и *3*, чем больше трение сыпучего массива о вмещающие породы, тем меньше давление и тем на меньшей глубине оно стабилизируется. Во всех остальных случаях нагрузка распределяется по параболе с двумя нулевыми точками (на поверхности засыпки и в основании крепи) и максимумом интенсивности давления на некоторой глубине от поверхности сыпучей среды. Это объясняется силами трения, действующими по поверхностям внешних и внутренних сдвигов, которые разгружают нижележащий слой сыпучего массива от влияния вышележащего. Форма параболических эпюр давления *4*—*9* определяется граничными условиями (см. подпись к рис. 2).

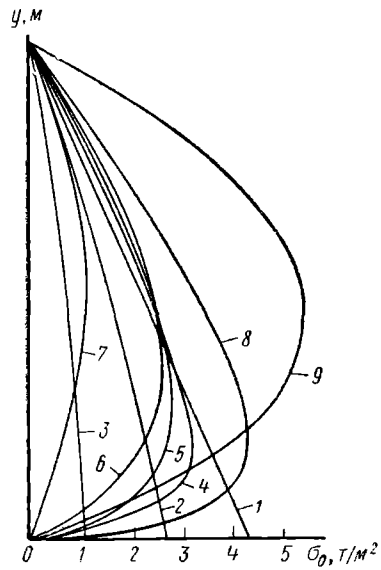


Рис. 2. Эпюры давления на ограждающую крепь при $f=0{,}7$. Для эпюр *2*, *3* и *7* $m=1$ *м*, $h=10$ *м*

Эпюры	ω, *град*	f_c	f_0
	0	0	0
2	0	0,3	0
3	0	0,6	0
4	0	0	0,2
5	0	0	0,4
6	0	0	0,6
7	0	0,6	0,6
8	12	0	0
9	27	0	0

Для определения положения максимума интенсивности давления в уравнении (16) введем относительную ординату $\eta=\frac{y}{h}$ и производную $\frac{d\sigma_0}{d\eta}$ приравняем нулю, тогда

$$y_{max}=h\left(1-\sqrt[k-1]{\frac{1}{k}}\right) \qquad (19)$$

Сама величина максимальной ординаты интенсивности давления найдется, если в уравнении (16) принять $y=y_{max}$.

Величина нормальной результирующей нагрузки на крепь

$$P_0=\int_0^h \sigma_0\,dy,$$

или

$$P_0=\frac{\gamma A n h^2}{2\frac{\zeta_c f_c}{m}h+2(1+k)} \qquad (20)$$

Сила трения

$$F_0=f_0P_0,$$

а полное результирующее давление

$$R_0=\sqrt{P_0^2+F_0^2}.$$

Компоненты результирующих давлений на кровлю пласта

$$\begin{aligned} P_к&=\zeta_c Q;\\ F_к&=f_c P_к;\\ R_к&=\sqrt{P_к^2+F_к^2}, \end{aligned} \qquad (21)$$

где Q — вертикальное результирующее давление, равное правой части уравнения (20) без коэффициента n.

Давление сыпучей породы на лежачий бок пласта

$$P_{\text{п}} = P_{\text{к}} + \gamma mh\cos\alpha;$$
$$F_{\text{п}} = f_{\text{с}} P_{\text{п}}; \qquad (22)$$
$$R_{\text{п}} = \sqrt{P_{\text{п}}^2 + F_{\text{п}}^2}.$$

Следует иметь в виду, что по формулам (20)—(22) определяется погонная нагрузка.

Влияние граничных условий на величину давления P_0 характеризуют кривые, приведенные на рис. 3.

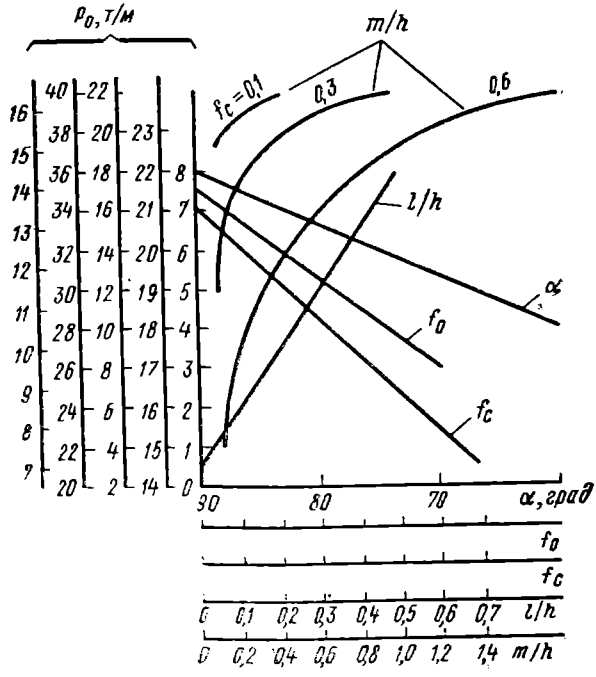


Рис. 3. Влияние граничных условий на величину нормального результирующего давления при $\gamma = 1{,}6$ т/м³, $f = 0{,}7$ и $l/h = \operatorname{tg}\omega$

Кривые	град	f_0	$f_{\text{с}}$	ω, град	m, м	h, м
		0,6	0,6	0		10
	90		0	0		
$f_{\text{с}}$	90			0		10
l/h	90		0			
			0,1			
$m/$	90	0,5	0,3	0		
			0,6			

С уменьшением угла падения пласта α, а также с увеличением коэффициентов трения сыпучей породы о крепь f_0 и вмещающие породы $f_{\text{с}}$ давление на крепь уменьшается, а с увеличением угла ω, определяемого из отношения $l/h = \operatorname{tg}\omega$, оно возрастает. С увеличением

мощности пласта нагрузка на крепь вначале интенсивно возрастает, приращение давления асимптотически уменьшается, а при достижении определенного значения соотношения m/h давление на крепь стабилизируется. Это объясняется тем, что с увеличением соотношения m/h силы трения на висячем и лежачем боках пласта оказывают все меньшее влияние на величину давления. При $P_0=\text{const}$ пространственная задача автоматически переходит в плоскую. Чем больше значение коэффициента трения f_c, тем при большем значении m/h утрачивается влияние сил трения на почве и кровле. При $f_c=f$ плоское напряженное состояние массива наступает при $m=2{,}5\,h$.

Значение R_0 представим в следующем виде:

$$R_0=\frac{1}{2}\,\gamma\zeta_a h^2, \tag{23}$$

где ζ_a — коэффициент активного давления сыпучей породы на крепь,

$$\zeta_a=\frac{2nA\sqrt{1+f_0^2}}{2-\frac{\zeta_c f_c}{m}\,h+2(1\quad k)} \tag{24}$$

При известных значениях γ и h величина давления R_0 зависит только от коэффициента активного давления.

Значения коэффициента бокового давления на ограждающую крепь в зависимости от величины m/h (при $f=0{,}7$; $\alpha=90°$; $\omega=0$)

	ζ_a											
	при $f_c=0{,}6$											при $f_c=0$ (по Кулону)
	Значение $m/$											
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9		1,3	1,5		1,9	2,1	
0	0,117 / 133	0,182 / 49,5	0,216 / 26,2	0,234 / 16,2	0,249 / 9,5	0,256 / 6,4	0,262 / 3,8	0,272 / 0	—	—	—	0,272
0,3	0,111 / 122	0,167 / 47,0	0,195 / 25,4	0,217 / 13,0	0,232 / 5,6	0,237 / 3,4	0,240 / 2,1	0,242 / 0,8	0,245 / 0	—	—	0,245
0,5	0,107 / 116	0,150 / 54,0	0,179 / 29,0	0,200 / 15,0	0,210 / 10,0	0,220 / 5,0	0,226 / 2,2	0,228 / 1,3	0,230 / 0,4	0,231 / 0	—	0,231
0,7	0,100 / 108	0,126 / 67,0	0,148 / 42,0	0,167 / 25,6	0,181 / 16,1	0,189 / 11,1	0,198 / 6,0	0,203 / 3,5	0,206 / 1,9	0,209 / 0,5	0,210 / 0	0,210

В таблице даны абсолютные величины коэффициента ζ_a (числитель) для различных значений соотношений m/h и для некоторых значений коэффициента f_0, а также данные расхождений (в процентах) результатов расчета в плоской и пространственной задачах (знаменатель).

Величина давления сыпучих пород на крепь при всех прочих равных условиях зависит от положения плоскости обрушения. Наибольшему давлению будет удовлетворять плоскость, для которой угол θ

находится из условия $\frac{dP_0}{d\theta}=0$. В уравнении (20) заменяем n k их значениями, тогда после решения получим

$$\operatorname{tg}\theta=\frac{\mu_2+\sqrt{\mu_2^2+4\mu_1\mu_3}}{2\mu_1} \qquad (25)$$

где μ_1, μ_2, μ_3 — коэффициенты, учитывающие влияние граничных условий на положение плоскости скольжения,

$$\begin{aligned}
\mu_1&=A_0(K_c f-A_к)-K_c\operatorname{tg}\omega(1+f^2)(2+A_0)+2(A_к+K_c f);\\
\mu_2&=4f[(A_к+K_c f)+0{,}5A_0(K_c f-A_к)];\\
\mu_3&=2f[(K_c-A_к f)+0{,}5A_0(K_c+A_к f)];\\
A_к&=f_0+\operatorname{tg}\omega;\\
K_c&=1-f_0\operatorname{tg}\omega;\\
A_0&=2\frac{f_c f_c}{m}h.
\end{aligned} \qquad (26)$$

Исследование уравнения (25) показывает, что с увеличением коэффициентов f и f_c угол θ возрастает, а с увеличением коэффициента f_0 и соотношения m/h он уменьшается. В последнем случае уменьшение угла θ происходит по экспоненциальной кривой, т. е. при достижении некоторого значения соотношения m/h положение плоскости скольжения стабилизируется. Влияние коэффициентов трения f и f_0 и соотношения m/h на величину угла θ приведено на рис. 4.

При положительном ω с увеличением его значения угол θ возрастает и стремится к своему предельному значению (86°). Чем больше шероховатость внутренней поверхности ограждающей крепи, тем при более крутом положении линии очистного забоя угол θ достигает своего предельного значения (рис. 5). С увеличением трения сыпучего массива о вмещающие породы пласта отмечается такая же закономерность. Чем больше соотношение m/h, тем большему углу отклонения ω отвечает предельное положение плоскости скольжения.

Для диагонального расположения линии очистного забоя уравнение (25) при определенных граничных условиях может давать результаты в виде комплексного числа, что будет связано с величиной угла ω. В данном случае в расчетах следует исходить из $\theta=86°$ Предельный угол отклонения ω, которому соответ-

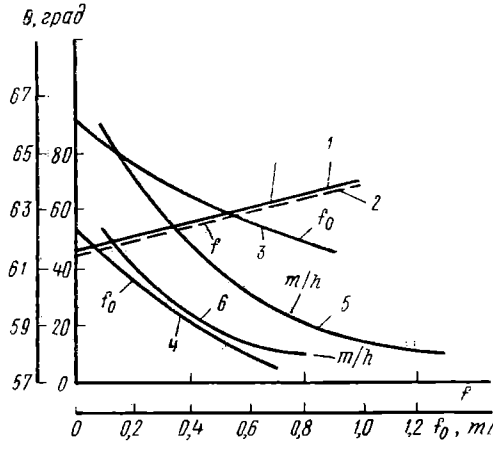


Рис. 4. Влияние f, f_0 и m/h на положение плоскости обрушения при $\omega=0°$

Кривые	Обозначение на графике	f_c	f	f
		0		
		0		0,9 0,7
	m/h	0,7 0,4		0,7

Примечание. Кривая *1* рассчитана по выражению (25); кривая *2* — по формуле Кулона $\theta=45+\frac{\varphi}{2}$, где φ — угол внутреннего трения сыпучего массива.

ствует предельное положение плоскости скольжения, определится, если в уравнении (25) принять $\theta = 86°$ и решить при заданных других граничных условиях.

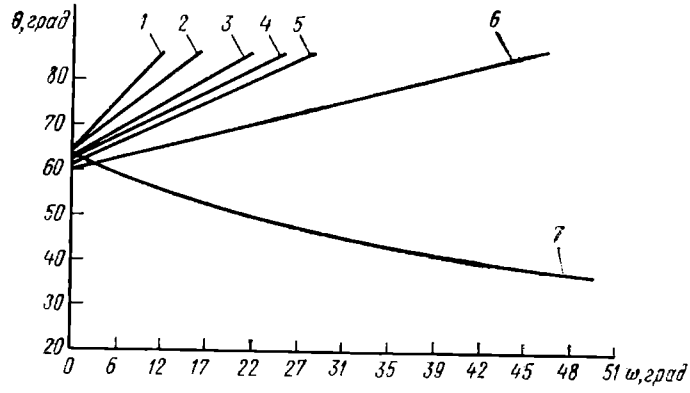


Рис. 5. Влияние угла ω на положение плоскости обрушения при $f=0{,}7$. Для кривых *1—6* $h=10$ *м*

Кривые	f_0	f_c	m, *м*
1	0,7	0,6	
2	0,5	0,6	
3	0	0,6	
4	0,5	0,6	
5	0,5	0,3	
6	0,5	0,6	
7	0	0	

Комплексному результату уравнения (25) могут соответствовать отрицательные значения коэффициентов n и k. Поскольку, однако, силы трения не могут быть направленными в сторону действия давления, в расчетах всегда следует принимать абсолютные значения этих величин.

При отрицательном значении угла ω угол θ уменьшается и по величине может достигать значения угла внутреннего трения сыпучего массива.

Положение центра давления от подошвы крепи может быть найдено посредством деления статического момента эпюры давления, взятого относительно основания, на площадь эпюры:

$$z_0 = \frac{2(1+k)h}{3(2+k)}. \qquad (27)$$

На рис. 6 приведены кривые, характеризующие влияние граничных условий на положение центра давления.

Для проверки теоретических выводов произведено сопоставление расчетов с конкретным числовым материалом, полученным непосредственно из опыта. Так, сравнение расчетов с опытными данными Г П. Канканяна [3] показало расхождение на 2—6%, а с данными

З. В. Цагарели [4, 5] на 4—11%. Параболический характер распределения давления на реальные (шероховатые) ограждения также подтверждается результатами экспериментов. Близкая сходимость расчетных данных с опытными свидетельствует о правомерности использованных принципов решения.

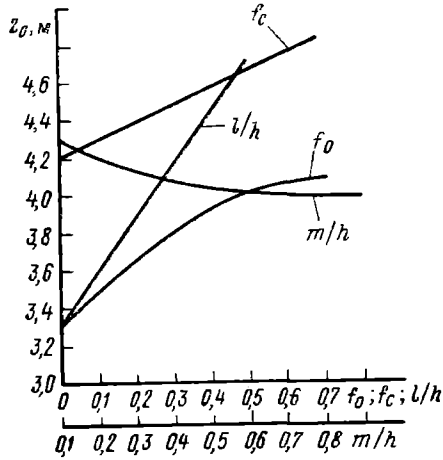


Рис. 6. Кривые изменения положения центра давления при $f=0{,}7$; $\frac{l}{h} = \operatorname{tg}\omega$. Для кривых f_c $m=1$ *м*, $h=10$ *м*

Кривые	f_c	f_0	ω, *град*
	0		0
		0,6	0
	0	0	
m/h	0,6	0,5	

Областью применения полученного решения являются многочисленные задачи горной практики, связанные с расчетом боковых нагрузок на различного рода ограждения подпорного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурцев А. И. Нагрузки от сыпучих пород на подвесные крепи крутопадающих пластов. Известия вузов. Горн. журн., 1962, № 3.

2. Воскобоев Ф. Н., Юдин Р. Э. Исследования проявлений горного давления и условий взаимодействия оградительных крепей с закладочным массивом, боковыми породами при разработке тонких крутых пластов комплексами 1КБС. Тр. ВНИМИ, вып. 73, 1969.

3. Канканян Г. П. Определение угла обрушения и давления сухого песка на подпорную стенку. Журн. техн. физики, т. VII, вып. 24, 1937.

4. Цагарели З. В. Экспериментальное исследование давления сыпучей среды на подпорные стены с вертикальной задней гранью и горизонтальной поверхностью засыпки. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1965, № 4.

5. Цагарели З. В. Экспериментальное исследование давления сыпучей среды на подпорные стены с наклонной задней гранью в сторону засыпки. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1967, № 3.