Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVII, вып. 1, 1969 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАМКА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ШТАНГИ РАСПОРНОГО ТИПА

М. М. Мордухович

Несущая способность замка металлической штанги распорного типа, как указывает О. В. Тимофеев [1], выражается зависимостью

$$P = N_0 m \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{мм}), \qquad (1)$$

где N_0—допускаемое усилие на породу при вдавливании в нее распорного элемента замка; m—число распорных элементов замка; α—половина угла заострения клина; $\varphi_{мм}$—угол трения головки стержня о распорный элемент (металла о металл).

Формулой (1) следует пользоваться при условии

$$\alpha + \varphi_{мм} < \varphi_{мп},$$

где $\varphi_{мп}$—угол трения распорного элемента о породу. *

В работе [1] величина N_0 определяется из условия

$$N_0 = \frac{S\sigma_{вд}}{k}, \qquad (2)$$

где S—площадь контакта распорного элемента с породой; $\sigma_{вд}$—сопротивление породы вдавливанию; k—коэффициент, учитывающий снижение прочности пород вследствие длительного действия нагрузки и трещиноватости ($k=2-3$).

Ориентировочные значения $\sigma_{вд}$ могут быть установлены, исходя из соотношения Л. А. Шрейнера [2] $\sigma_{вд} \approx 7\sigma_{сж}$, где $\sigma_{сж}$—предел прочности породы на одноосное сжатие. Фактические значения сопротивления вдавливанию определяются испытанием пород на вдавливание в скважинах [3]. Такой метод требует проведения шахтных экспериментов, что не всегда удобно.

А. Югон и А. Кост [4], Б. К. Чукан [5] определяют величину напряжений в породе при вдавливании в нее распорных элементов замка, применяя решение плоской контактной задачи Буссинеска для случая вдавливания круглого в плане штампа с плоским основанием в плоскую поверхность. С использованием его в данном случае нельзя согласиться. Задача о распределении напряжений при вдавливании в цилиндрическую поверхность цилиндрического штампа ограниченной длины, имеющего в плане прямоугольную форму, что соответствует

* Значения углов $\varphi_{мм}$ и $\varphi_{мп}$ приведены в работе [1].

рассматриваемому случаю, в литературе не встречается. В связи с этим при определении величины нормальных напряжений на поверхности контакта вдоль поперечной и продольной осей штампа будем исходить из имеющихся решений контактных задач о вдавливании цилиндрического штампа бесконечной длины в цилиндрическую поверхность и плоского штампа в плоскую поверхность. Первая из указанных задач была впервые решена Г. Герцем [6] и детально разработана И. Я. Штаерманом [7]. На рис. 1,*а* приведен характер распределения напряжений на поверхности контакта.

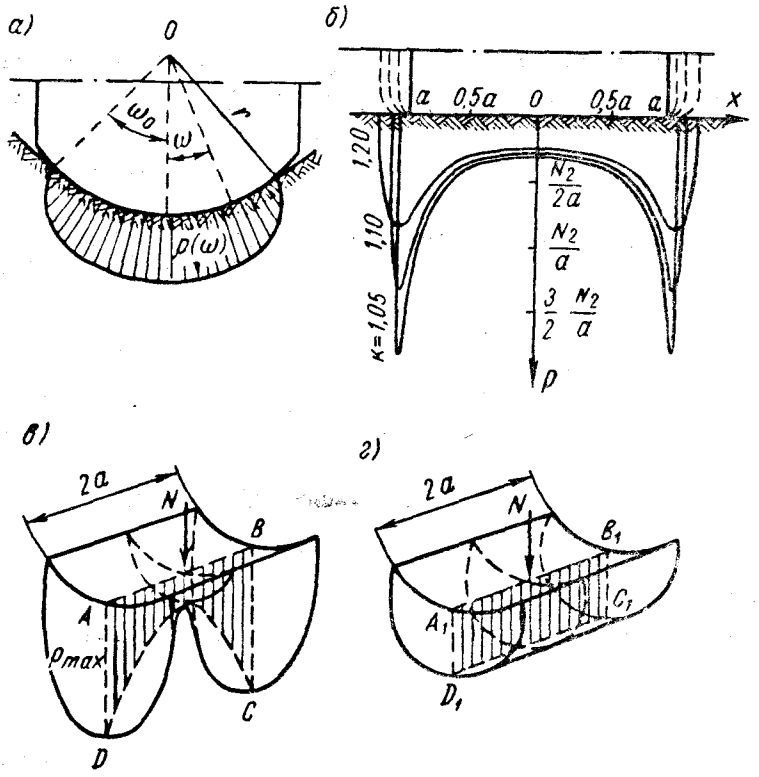


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений на поверхности контакта при вдавливании:

а)—цилиндрического штампа бесконечной длины в цилиндрическую поверхность; *б*)—плоского штампа бесконечной длины в плоскую поверхность; *в*) цилиндрического штампа длиной $2a$ в цилиндрическую поверхность; *г*) цилиндрического штампа бесконечной длины в цилиндрическую поверхность на участке длиной $2a$.

Для практических расчетов И. Я. Штаерман рекомендует пользоваться известной [8] приближенной формулой, предусматривающей контакт соприкасающихся тел по цилиндрической поверхности радиуса r в области значений угла $\omega < \omega_0$

$$p_{(\omega)} = \frac{N_1 \cos \omega}{r(\sin \omega_0 \cos \omega_0 + \omega_0)}, \qquad (3)$$

где $p_{(\omega)}$—нормальные напряжения на поверхности контакта соприкасающихся тел; N_1—усилие на единицу длины бесконечно длинного цилиндрического штампа; ω_0—центральный угол, соответствующий половине длины дуги поверхности контакта, радиан; ω—центральный угол, соответствующий рассматриваемой точке на поверхности контакта.

При $\omega_0=50\div 70°$ значения максимальных напряжений, рассчитанные по этой формуле, отличаются от определенных по точным формулам не более, чем на $5-7\%$.

И. Я. Штаерманом были получены также эпюры распределения напряжений при вдавливании плоского штампа в плоскую поверхность (рис. 1,*б*) при различном радиусе кривизны краев штампа, характеризующемся

$$k_1=\frac{b}{a},$$

где a и b—соответственно половина ширины поверхности штампа, касающейся упругого полупространства до приложения нагрузки и при вдавливании.

Поскольку кривизна торцевых закраин распорных элементов замков металлических штанг весьма велика, k_1 можно считать равным 1,03—1,05. Величина максимальных нормальных напряжений на поверхности контакта может быть с достаточным запасом выражена формулой

$$p_{max}=\frac{2N_2}{a}, \qquad (4)$$

где N_2—усилие на единицу длины бесконечно длинного плоского штампа.

На основании изложенного можно предположить, что распределение нормальных к поверхности контакта напряжений в рассматриваемой объемной задаче будет представлено эпюрой, изображенной на рис. 1,*в*.

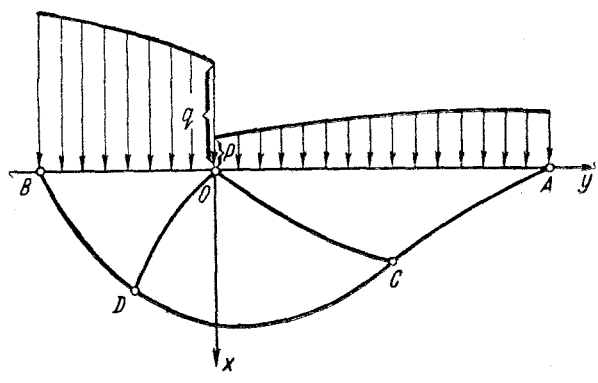


Рис. 2. Расчетная схема В. В. Соколовского.

Для установления зависимости между величиной максимальных нормальных напряжений p_{max} и приложенной силой N рассмотрим вдавливание штампа цилиндрической формы неограниченной длины в цилиндрическую поверхность и выделим участок длиной $2a$. Согласно решению плоской контактной задачи, распределение напряжений в этом случае будет представлено эпюрой, приведенной на рис. 1,*г*.

При одном и том же усилии вдавливания сумма возникающих на поверхности контакта нормальных напряжений должна быть одинакова в том и другом случаях и равна $N=N_1 2a$. Следовательно, должны быть равны суммы нормальных напряжений по одинаково расположенным радиальным сечениям, в частности, по $ABCD$ и $A_1B_1C_1D_1$.

Сумму нормальных напряжений по сечению $A_1B_1C_1D_1$ можно определить по формуле (3), принимая $\omega=0\,(\cos\omega=1)$

$$\sum_{A_1B_1C_1D_1}\sigma=\frac{N}{r(\sin\omega_0\cos\omega_0+\omega_0)}. \qquad (5)$$

Считая N_2 в формуле (4) равным $\sum_{A_1B_1C_1D_1}\sigma$, получим

$$p_{max}=\frac{2N}{ar(\sin\omega_0\cos\omega_0+\omega_0)}. \qquad (6)$$

Для нахождения связи между величиной максимальных нормальных напряжений и прочностными характеристиками породы воспользуемся формулой В. В. Соколовского [9] для определения допускаемой величины интенсивности давления на основание (рис. 2)

$$q+A=(p+A)\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\exp(\pi\operatorname{tg}\varphi), \qquad (7)$$

где q—величина нормальных напряжений слева от точки 0; p—то же справа; φ—угол внутреннего трения породы.

$$A=c\operatorname{ctg}\varphi, \qquad (8)$$

где c—сцепление породы.

Для упрощения расчета заменим криволинейную огибающую наибольших кругов Мора прямолинейной. Тогда

$$c=\frac{\sigma_{сж}}{2\operatorname{tg}\left(45^\circ+\frac{\varphi}{2}\right)}. \qquad (9)$$

Подставляя (9) в (8), а (8) в (7) и принимая в формуле (7) $p=0$, что соответствует рассматриваемой задаче, получим выражение для величины предельных нормальных напряжений при вдавливании распорных элементов замка металлической штанги в бока скважины

$$q=\frac{\sigma_{сж}\operatorname{ctg}\varphi}{2\operatorname{tg}\left(45^\circ+\frac{\varphi}{2}\right)}\times$$

$$\times\left[\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\exp(\pi\operatorname{tg}\varphi)-1\right]. \qquad (10)$$

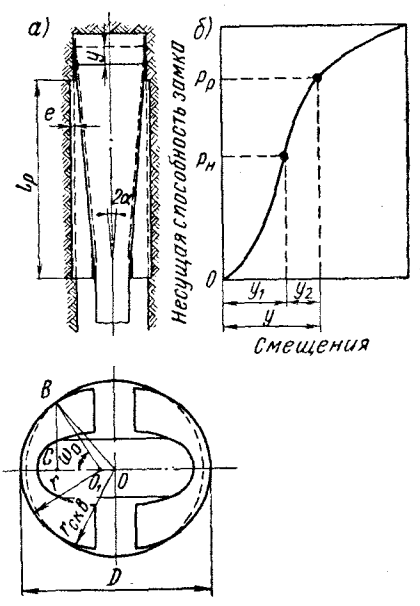


Рис. 3. К определению расчетной несущей способности замка:

а) схема для установления зависимости ω_0 от глубины внедрения e и смещения y; *б*) график зависимости несущей способности P от смещения y.

Допускаемое усилие распора элементов замка в бока скважины определим, приравнивая q (10) и p_{max} (6) и вводя коэффициенты, учитывающие снижение прочности породы в массиве

$$N_0=\frac{ql_p r(\sin\omega_0\cos\omega_0+\omega_0)\xi}{4\eta}, \qquad (11)$$

где $l_р$—длина распорного элемента ($l_р=2a$); ξ—коэффициент снижения прочности пород при длительном нагружении (см. [1]); η—коэффициент, учитывающий снижение прочности пород вследствие их трещиноватости ($\eta=1{,}5-2$).

Подставляя найденное значение N_0 в формулу (1), можно определить несущую способность замка.

Формула (11) справедлива для пород, склонных к хрупкому разрушению. Для упруго-пластичных пород она дает некоторый запас прочности.

Величина угла ω_0 зависит от размеров элементов замка, диаметра скважины и глубины внедрения распорных элементов в породу.

При распорно-клиновом замке с двумя несвязанными распорными сегментами (рис. 3,*а*), обозначая радиус скважины OB через $r_{скв}$, на-

ружный радиус сегмента $O_1B=r$ и отрезок $CO_1=d$, получим на основании геометрических построений

$$\cos\omega_0=\frac{d}{r}=\frac{rD+r^2_{\text{скв}}-\frac{D^2}{4}-2r^2}{r(D-2r)}, \qquad (12)$$

откуда

$$\omega_0=\arccos\left[\frac{rD+r^2_{\text{скв}}-\frac{D^2}{4}-2r^2}{r(D-2r)}\right]\frac{\pi}{180^\circ}, \qquad (13)$$

$$D=2(r_{\text{скв}}+e), \qquad (14)$$

где e—глубина внедрения распорных элементов замка в породу.

Вычисления по формуле (13) трудоемки. В связи с этим на рис. 4,*б* приведены графики зависимости ω_0 от e при различной величине $r_{\text{скв}}$ и наиболее распространенном значении $r=20$ *мм*. После подстановки (11) в (1), получим

$$P=\frac{ql_p r(\sin\omega_0\cos\omega_0+\omega_0)m\,\text{tg}(\alpha+\varphi_{\text{мм}})\xi}{4\eta}. \qquad (15)$$

Пользуясь зависимостью ω_0 от e, можно определить величину P как функцию e.

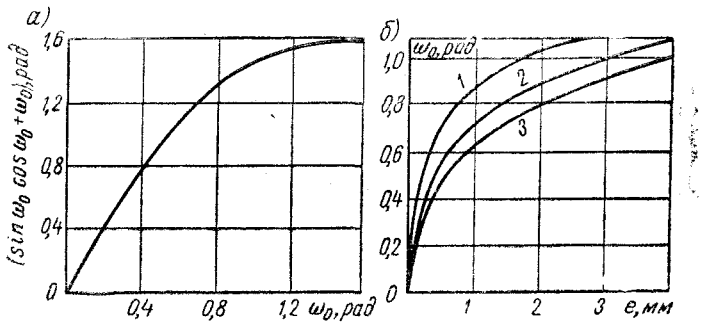


Рис. 4. Графики зависимости:

а) $(\sin\omega_0\cos\omega_0+\omega_0)$ от ω_0 и *б*) ω_0 от e при $r_{\text{скв}}$, *мм*: *1*—21; *2*-22; *3*—23.

Установленная зависимость справедлива при условии, что сопротивление породы вдавливанию не изменяется с увеличением глубины вдавливания. В действительности порода вблизи контура ослаблена вследствие ее нарушения при бурении скважины и развития неупругих деформаций в процессе эксплуатации скважины.

Ориентировочно этот фактор можно учесть, увеличивая фактическую величину $r_{\text{скв}}$ на 1—1,5 *мм*.

Глубина внедрения распорных элементов замка в бока скважины связана с величиной смещения головки штанги относительно распорных элементов y прямолинейной зависимостью

$$e=y\,\text{tg}\,\alpha. \qquad (16)$$

Задаваясь величиной y, можно, в конечном итоге, определить соответствующую этому смещению расчетную несущую способность замка (рис. 3,*б*). Величина y включает в себя первоначальные смещения y_1,

вызванные натяжением штанг при их установке, и последующие y_2, обусловленные нагрузкой на штангу при ее эксплуатации, т. е.

$$y=y_1+y_2. \tag{17}$$

Известно, что для надежной работы металлической штанговой крепи величина начального натяжения $P_н$ должна быть не менее 3—4 *т*. Принимая такое значение $P_н$ и пользуясь формулой (15), определим значение выражения $(\sin\omega_0\cos\omega_0+\omega_0)$, по которому на графике рис. 4,*а* установим соответствующую величину ω_0. По этой величине, пользуясь графиком рис. 4,*б* найдем значение *e*, подставляя которое в формулу (16), определим y_1. Величина y_2 принимается такой, чтобы обеспечивалась достаточная жесткость крепи, т. е. обычно не более 20—30 *мм*. Значение y_2 должно быть уточнено в конкретных условиях наблюдениями за смещениями контура, расслоением пород и деформациями опорных элементов. Определив значение *y*, можно установить расчетную несущую способность замка $P_р$. При выборе размеров элементов замка следует руководствоваться рекомендациями, приведенными в работе [1].

Проиллюстрируем вышеизложенное на конкретном примере. Установим допускаемую нагрузку на замок штанги ШК-1 конструкции института ВНИИГИДРОУГОЛЬ при закреплении в алевролите, характеризующемся $\sigma_{сж}=400$ *кг/см*^{2}, $\varphi=31°$. Размеры элементов замка штанги: $l_р=11$ *см*, $r=2$ *см*; $\alpha=3°$; радиус скважины $r_{скв}=2{,}2$ *см*; $m=2$; $\varphi_{мм}=10°$; $\gamma_1=1{,}6$.

Снижение прочности пород при длительном нагружении не учитываем ($\xi=1$), так как расчетные данные будут сопоставлены с результатами кратковременных испытаний штанг на вытягивание.

Величина предельных нормальных напряжений при вдавливании распорных элементов замков металлических штанг в бока скважин по формуле (10)

$$q=\frac{400\cdot1{,}664}{2\cdot1{,}732}\left[\frac{1+0{,}515}{1-0{,}515}\exp(3{,}14\cdot0{,}6)-1\right]=3770\ кг/см^2.$$

Задаваясь величиной $P_н=4$ *т* и используя формулу (15), получим

$$\sin\omega_0\cos\omega_0+\omega_0=\frac{4P\gamma_1}{ql_рrm\operatorname{tg}(\alpha+\varphi_{мм})\xi}=\frac{4\cdot4000\cdot1{,}6}{3770\cdot11\cdot2\cdot2\cdot0{,}231\cdot1}=0{,}668\ рад.$$

Согласно рис. 4,*а* $\omega_0=0{,}345$ *рад*. Принимаем расчетное значение радиуса скважины

$$r_{скв.\,р}=r_{скв}+1=21+1=22\ мм.$$

На рис. 4,*б* находим значение *e*, соответствующее $\omega_0=0{,}345$ *рад* при $r_{скв}=22$ *мм*

$$e=0{,}23\ мм,$$

$$y_1=\frac{e}{\operatorname{tg}\alpha}=\frac{0{,}23}{0{,}0526}\cong5\ мм.$$

Принимаем величину $y_2=25$ *мм*. Тогда

$$y=5+25=30\ мм,$$

$$e=30\cdot0{,}0526=1{,}58\ мм.$$

Этому значению *e* на рис. 4,*б* соответствует $\omega_0=0{,}824$ *рад*. Согласно графику рис. 4,*а*

$$\sin\omega_0\cos\omega_0+\omega_0=1{,}32\ рад.$$

Расчетная несущая способность замка по формуле (15)

$$P=\frac{3770\cdot 11\cdot 2\cdot 1{,}32\cdot 2\cdot 0{,}231\cdot 1}{4\cdot 1{,}6}=7903\ кГ.$$

В процессе шахтных испытаний штанг ШК-1 при смещении конца стержня на величину 30 *мм* нагрузка составила 8—10 *т*, т. е. близка к расчетной.

Предлагаемый метод расчета справедлив для замков штанг распорного типа с несвязанными распорными сегментами. Однако аналогичные зависимости могут быть выведены и для других конструкций замков металлических штанг распорного типа. При этом фактическую поверхность контакта замка штанги с породой, имеющую криволинейное очертание, следует приводить к эквивалентной прямоугольной в плане поверхности и в формулу (6) вместо величины a подставлять половину длины этой фиктивной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семевский В. Н. и др. Штанговая крепь. Недра, 1965.
2. Шрейнер Л. А. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. Гостоптехиздат, 1958.
3. Тимофеев О. В., Мордухович М. М. Испытания угля в массиве на прочность при вдавливании. Изв. ВУЗов. Горн. ж. № 6, 1967.
4. Югон А., Кост А. Штанговое крепление горных пород. Госгортехиздат, 1962.
5. Чукан Б. К. О выборе распорного замка при штанговом креплении. Шахтн. стр-во № 7, 1959.
6. Тимошенко С. П. Теория упругости. Гостехтеориздат, 1934.
7. Штаерман И. Я. Контактная задача теории упругости. Гостехиздат, 1949.
8. Патон Е. О., Горбунов Б. Н. Стальные мосты, т, II. Киев, 1931.
9. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Гостехтеориздат, 1954.