Киселев, Н.П. Бушуев. – М.: Недра, 1976. – 508 с.

14. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки.– М.: Стройиздат, 1982. – 32 с.

15. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.

16. *Должиков, П.Н.* Электрохимический тампонаж обводненных неустойчивых горных пород при строительстве устьев шахтных стволов / Автореф. дисс… канд. техн. наук. – Днепропетровск: ДГИ им. Артема, 1989. – 16 с.

17. Основания и фундаменты: Справочник / Г.И. Швецов, И.В. Носков, А.Д. Слободан, Г.С. Госькова. – М.: Высш. школа, 1991. – 383 с.

18. *Джаиани Л.Г.* Изменение главнейших физико-механических свойств торфов Колхиды в процессе их обработки постоянным электрическим током // Материалы к VII Всесоюзному совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – С. 243-246

19. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наукова думка, 1975. – 704 с.

20. *Трупак Н.Г.* Расчет перемычки для горизонтальных горных выработок / Н.Г. Трупак, Н.Г. Логачев, А.А. Олиференко. // Шахтное строительство. – 1981. – № 3. – С. 10-12.

21. *Трупак Н.Г.* О толщине тампонажных подушек / Н.Г. Трупак, Н.Г. Логачев, А.А. Олиференко // Шахтное строительство. – 1979. - № 11. – С. 16-20.

22. *Соболевский Ю.А.* Механика грунтов. – Минск: Вышнейшая школа, 1986. – 176 с.

Авторы статьи:

Глазков Юрий Федорович - канд. техн. наук, доц. каф. «Сопротивление материалов»

Простов Сергей Михайлович – докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Рудковский Дмитрий Игоревич - ассистент каф. «Технология строительного производства»

УДК 622.267.33

Ю.Ф. Глазков, С.М. Простов, Д.И. Рудковский

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАКРЕПЛЕННОЙ ПОРОДНОЙ ОБОЛОЧКИ ВОКРУГ ВЫРАБОТОК В УПРУГОМ РЕЖИМЕ

При сравнительно малых значениях глубин залегания выработки H, вертикальных $q_в$ и горизонтальных $q_г$ нагрузок, породная оболочка будет работать в допредельной стадии, и такую схему работы можно считать упругой. Условие надежности крепи в этом случае можно сформулировать по критерию прочности в локальной зоне конструкции (в опасной зоне). При моделировании задача расчета реальной системы «капитальная крепь – породная оболочка» (К-О) сводится к расчету плоских деформаций методами теории упругости.

В качестве первого приближения к реальной конструкции (рис. 1, а) была принята идеализированная схема (рис. 1, б) в виде толстостенного кругового кольца. Внешняя нагрузка определяется компонентами $q_г$ и $q_в$, реакция крепи моделируется внутренним давлением $q_к$.

Определение напряжений и перемещений в породной оболочке производится по схеме Г. Кирша [1]. В соответствии с этим решением при λ=0 (отсутствует боковое давление) вертикальное давление можно разделить на две компоненты: осесиметричную (гидростатическую) q_0 = 0.5$q_в$ (рис. 2, а); кососимметричную q_* = 0.5 $q_в$. Последняя сила в свою очередь может быть разложена на нормальную $q_{n*} = 0{,}5q_в \cos 2\theta$ и касательную $q_{\tau*} = -0{,}5q_в \sin 2\theta$ компоненты (рис. 2, б).

Компоненты напряжений и перемещений от осесимметричной компоненты нагрузки известны как решение задачи Ляме [2, 3]:

$$\sigma_r^0, \sigma_\theta^0 = -\frac{b^2 q_0}{b^2 - a^2} \pm \frac{a^2 b^2 q_0}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2},$$

$$u_0 = -\frac{1+\mu}{E}(1-2\mu)\frac{b^2 q_0}{b^2 - a^2} r - \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{a^2 b^2 q_0}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2}$$

Зависимость напряжения от кососимметричной компоненты нагрузки q_* можно найти с помощью функции:

$$\varphi(r,\theta) = f(r)\cos 2\theta .$$

В [1] приведены формулы для определения напряжений и перемещений от q_*:

$$\begin{cases} \sigma_r^* = -(2A + \frac{6C}{r^4} + \frac{4D}{r^2})\cos 2\theta, \\ \sigma_\theta^* = (2A + 12Br^2 + \frac{6C}{r^4})\cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta}^* = (2A + 6Br^2 - \frac{6C}{r^4} - \frac{2D}{r^2})\sin 2\theta. \end{cases}$$

где *A, B, C, D* – произвольные постоянные интегрирования, которые могут быть найдены из граничных условий задачи.

Последние приводят к системе четырех уравнений:

$$\begin{cases} 2A+\dfrac{6C}{b^4}+\dfrac{4D}{b^2}=-0{,}5q_{\text{в}} \\ 2A+\dfrac{6C}{a^4}+\dfrac{4D}{a^2}=0 \\ 2A+6Bb^2-\dfrac{6C}{b^4}-\dfrac{2D}{b^2}=-0{,}5q_{\text{в}} \\ 2A+6Ba^2-\dfrac{6C}{a^4}-\dfrac{2D}{a^2}=0 \end{cases} \qquad (1)$$

Решение системы (1) может иметь, например, следующий вид:

$$B=\frac{D_1}{D_0};\ C=\frac{D_2}{D_0};\ D=\frac{D_3}{D_0};\ A=-\frac{3C}{a^4}-\frac{2D}{a^2};$$

$$D_1=-36\frac{b^2-a^2}{a^4b^4}q_{\text{в}};$$

$$D_2=18\frac{b^4-a^4}{a^2b^2}q_{\text{в}};\ D_3=-36\frac{b^6-a^6}{a^4b^4}q_{\text{в}};$$

$$D_0=288\frac{(a^2-b^2)(b^6-a^6)}{a^6b^6}+216\frac{(a^4-b^4)^2}{a^6b^6}.$$

Для определения радиального u_* и тангенциального v_* перемещений воспользуемся уравнениями закона Гука в полярной системе координат:

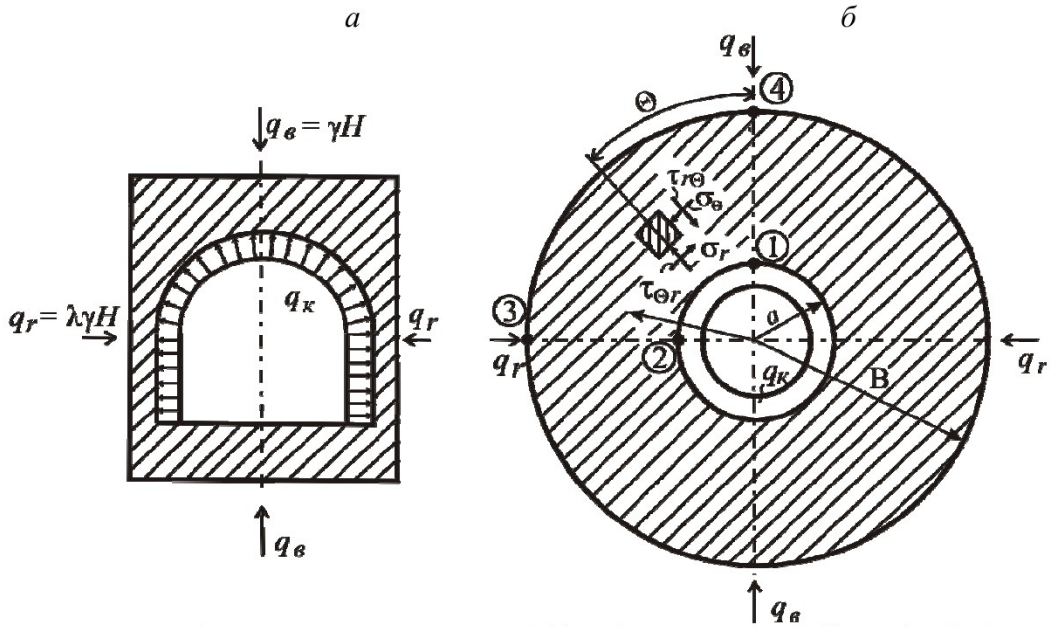

Рис. 1. Расчетные схемы реальной (а) и идеализированной (б) породной оболочки

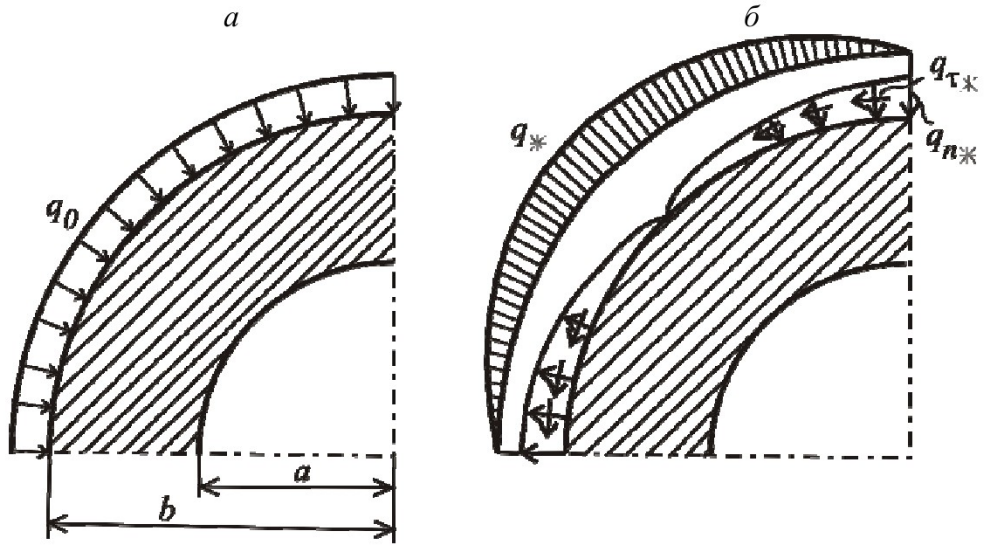

Рис. 2. Осесимметричная (а) и кососимметричная (б) компоненты вертикальной нагрузки

$$\varepsilon_\theta^* = \frac{1+\mu}{E}[(1-\mu)\sigma_\theta^* - \mu\sigma_r^*] =$$
$$= \frac{1+\mu}{E}[2A + \frac{6C}{r^4} + 12(1+\mu)Br^2 + \mu\frac{4D}{r^2}]\cos 2\theta,$$
$$\gamma_{r\theta}^* = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{r\theta}^* =$$
$$= \frac{2(1+\mu)}{E}[2A + 6Br^2 - \frac{6C}{r^4} - \frac{2D}{r^2}]\sin 2\theta. \quad (2)$$

Используя уравнения Коши, получим:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r},$$
$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r},$$
$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r}. \quad (3)$$

Подставив первое из уравнений (2) в соответствующее уравнение (3) и выполнив интегрирование, получим:

$$u_* = \frac{1+\mu}{E}[-2Ar + \frac{2C}{r^3} +$$
$$+(1-\mu)\frac{4D}{r} - 4\mu Br^3]\cos 2\theta + f_1(\theta), \quad (4)$$

где $f_1(\theta)$ - произвольная функция от θ, которая на основании требования кососимметричности и периодичности перемещений u_* и v_* с точностью до постоянного множителя a_1 должна иметь вид

$$f_1(\theta) = a_1 \cos\theta.$$

Преобразовав второе уравнение Коши (3) к виду

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = \varepsilon_\theta r - u$$

и подставив в его правую часть соответствующие выражения (2) и (4), произведя интегрирование, получим выражение для определения тангенциальных перемещений:

$$v_* = \frac{1+\mu}{2E}[4Ar + \frac{4C}{r^3} + Br^3(12-8\mu) +$$
$$+\frac{D}{r}(8\mu-4)]\sin 2\theta - \frac{a_1}{2}\sin 2\theta + f_2(r), \quad (5)$$

где $f_2(r)$ - произвольная функция от r.

Так как отсутствует кручение породного цилиндра относительно его продольной оси, то принимаем $f_2(r)=0$. Величина константы a_1 может быть найдена из условия удовлетворения последнего уравнения Коши (3). Подставив в него последнее уравнение (2), а также уравнения (4) и (5), после несложных преобразований придем к выводу, что $a_{1=0}$.

Для дальнейшего анализа примем $q_в=1$, $q_г=\lambda$ и $a=1$, т.е. напряжения определяем относительно веса столба грунта над выработкой γH, а размеры – относительно приведенного радиуса

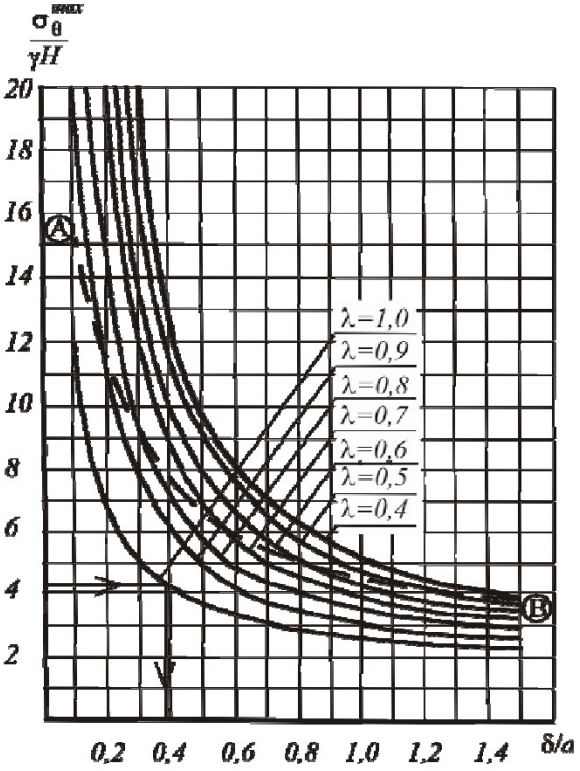

Рис. 3. Номограмма для определения толщины породной оболочки по упругой схеме работы

выработки в проходке a. Окончательные выражения для напряжений и перемещений принимают следующий вид:

$$\sigma_r = \sigma_r^0 + \sigma_r^* = \frac{1+\lambda}{2}\cdot\frac{b^2}{b^2-a^2}(1-\frac{a^2}{r^2}) -$$
$$-(1-\lambda)(2A + \frac{4D}{r^2} + \frac{6C}{r^4})\cos 2\theta;$$
$$\sigma_\theta = \sigma_\theta^0 + \sigma_\theta^* = \frac{1+\lambda}{2}\cdot\frac{b^2}{b^2-a^2}(1+\frac{a^2}{r^2}) +$$
$$+(1-\lambda)(2A + 12Br^2 + \frac{6C}{r^4})\cos 2\theta;$$
$$\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}^* = (1-\lambda)(2A + 6Br^2 - \frac{6C}{r^4} - \frac{2D}{r^2})\sin 2\theta;$$
$$u = u_0 + u_* = \frac{1+\lambda}{2}\cdot\frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{b^2}{b^2-a^2}\times$$
$$\times\left[(1-2\mu)r + \frac{a^2}{r}\right] + (1-\lambda)\frac{1+\mu}{E}[-2Ar + \frac{2C}{r^3} +$$
$$+(1-\mu)\frac{4D}{r} - 4\mu Br^3]\cos 2\theta, \quad (6)$$
$$v = v_* = (1-\lambda)\frac{1+\mu}{E}[4Ar + \frac{4C}{r^3} +$$
$$+Br^3(12-8\mu) + \frac{D}{r}(8\mu-4)]\sin 2\theta.$$

Соответствующие выражения для определе-

ния напряжений и перемещений от реакции крепи [4]:

$$\sigma_r^{\text{к}}, \sigma_\theta^{\text{к}} = \frac{a^2 q_{\text{к}}}{b^2 - a^2} \mp \frac{a^2 b^2 q_{\text{к}}}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2},$$

$$u_{\text{к}} = -\frac{1+\mu}{E}\left[(1-2\mu)\frac{b^2 q_{\text{к}}}{b^2 - a^2} r + \frac{a^2 b^2 q_{\text{к}}}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r}\right]. \quad (7)$$

Далее численно производится определение постоянных *A, B, C, D,* напряжений σ_θ при $r=a$, $r=b$, $\theta=\pi/2$, $\theta=0$ (точки 1, 2, 3, 4 на рис. 1, б) с использованием интегрированного математического пакета MathCAD для различных значений толщины породной оболочки $\delta=a-b$ и коэффициента бокового давления λ. На основании полученных результатов построены графики изменения относительной величины σ_θ^{max} в зависимости от $0{,}4 \le \lambda \le 1{,}0$ безразмерной толщины оболочки δ/a для различных значений λ в диапазоне $0{,}4 \le \lambda \le 1{,}0$ (рис. 3).

Из рис. 3 следует, что при увеличении δ для фиксированного значения λ напряжения асимптотически уменьшаются, т.е. стремятся к некоторому пределу. Так, при $\lambda=1$:

$$\sigma_\theta^{max} \to 2,$$

что соответствует решению задачи Ляме и применяется для расчета ледопородных оболочек при сооружении вертикальных стволов шахт [1].

Такая особенность в изменении σ_θ^{max} приводит к двум следствиям:

- толщина оболочки δ не должна быть излишне большой;
- если прочность породы становится меньше асимптотического значения σ_θ^{max} для принятого значения λ, то это означает, что в породной оболочке начинает образовываться зона предельного равновесия при сколь угодно большом значении δ, что, в свою очередь, заставляет менять расчетную схему или предусматривать такую технологию упрочнения, которая позволила бы получить более высокую прочность.

Последнее следствие фактически является условием выбора расчетной схемы. Важно указать, что пунктирной линией АВ на рис. 3 помечена граница значений δ и λ, при которых в опасных точках 1, 2, 3 или 4 возникают растягивающие тангенциальные напряжения. Это означает, что если точка на номограмме, соответствующая заданным значениям δ и λ, расположена выше отмеченной линии АВ, то в одной из указанных опасных точек возникнет растяжение. Обычно в горных породах σ_p значительно (в 10-15 раз) меньше $\sigma_{сж}$, поэтому растяжения желательно не допускать. Кроме того, для закрепленных грунтов величина σ_p неизвестна, что также приводит к рекомендации по недопущению растяжения в породной оболочке.

Отметим, что при прочности породы, близкой к асимптотическому значению σ_θ^{max} на номограмме (рис.3) вследствие малого наклона кривой к оси абсцисс δ/a даже малые изменения величины прочности, связанные с естественными погрешностями расчета, дают значительные изменения в величинах искомой толщины δ. Решение становится неустойчивым, и это делает необходимым ограничение в расчете по малой прочности закрепленной породы. С другой стороны, увеличить точность расчета можно гарантированным увеличением прочности закрепленной породы.

В первом приближении, при расчете можно вводить ограничение по углу наклона касательной к соответствующей кривой. В этом случае можно использовать условие:

$$\frac{\partial \sigma_\theta^{max}(\delta)}{\partial \delta} \le tg\alpha = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\delta},$$

где $\Delta\sigma$ и $\Delta\delta$ - допустимые значения погрешностей при назначении величин $\sigma_{\text{сж}}$ и δ . Так, назначив эти погрешности и построив угол α, проводим под этим углом касательную к соответствующей кривой. Точка касания определит нижнюю границу применимости расчета по первой расчетной схеме.

Влияние реакции капитальной крепи $q_к$ может быть учтено в рамках рассматриваемой расчетной схемы путем уменьшения расчетных напряжений в породной оболочке на величину

$$\sigma_\theta^{к} = q_к \frac{1+k^2}{1-k^2},$$

где $k=a/b$ - соотношение внутреннего и внешнего радиусов породной оболочки.

Очевидно, что величина $\sigma_\theta^{к}$ зависит от толщины породной оболочки $\delta=a-b$, которая по условию задачи неизвестна и подлежит определению. В этом случае учет реакции крепи нужно вести по схеме последовательных приближений, принимая при первом приближении $q_k=0$. После нахождения *a* и *b* в первом приближении определяют реакцию крепи по схеме Ф.А. Белаенко, изложенной в [5]. Поскольку при $\lambda \le 1$ конвергенция почвы и кровли выработки всегда будет положительной, то условие совместности деформаций надо записывать на вертикальной оси выработки при $\theta=0$, которое примет вид:

$$u_\infty^{\text{п}}(q_{\text{к}}) = u_0 + u(q_{\text{к}}), \quad (8)$$

где $u_\infty^{\text{п}}(q_{\text{к}})$ - смещение породного контура к мо-

менту установления статического равновесия в системе К-О; u_0 - начальные смещения породного контура, происходящие в период между выемкой породы и установкой капитальной крепи; $u(q_к)$ - смещения контура крепи к моменту установления статического равновесия в системе К-О.

С учетом конечных размеров системы К-О формула (8) примет вид:

$$u_\infty^п(q_к) = u_\Sigma(q) - u_0(q) - u_\infty(q_к), \qquad (9)$$

где $u_\Sigma(q)$ - полное перемещение от полного горного давления (нагрузки q), определяемое по формуле (6) с использованием длительного (статического) модуля деформации породы оболочки E_∞; $u_0(q)$ - существующее перемещение до проведения выработки; $u_\infty(q_к)$ - длительное перемещение от реакции крепи.

Величину $u_0(q)$ можно определить по формуле

$$u_0(q) = \frac{1+\mu}{E_\infty}[(1-\mu) - \mu\lambda]aq_в. \qquad (10)$$

Перемещение $u_\infty(q_к)$ определяют по формуле (7) с использованием величины E_∞. Наибольшая неопределенность возникает при нахождении u_0. Воспользуемся допущением, что поведение породной оболочки конечных размеров a и b и бесконечного массива в окрестности забоя выработки подобны. В этом случае для определения u_0 можно использовать зависимость из работы [5], которая примет вид

$$u_0 = [u_\Sigma(q) - u_0(q)]\frac{E_\infty}{E_0}C_1\left[\alpha + (1-\alpha)e^{\frac{-\tau}{t_p}}\right]C_2, \qquad (11)$$

где E_0 - начальный модуль деформации; $\alpha = E_\infty / E_0$ - коэффициент, учитывающий снижение модуля деформации за счет реологических процессов. По данным [5] для закрепления глинистых пород можно рекомендовать $\alpha = 1.3 - 1.5$; C_1 - коэффициент, учитывающий способ проведения выработки, в нашем случае для однородных пород при способах выемки, исключающих буровзрывные работы, можно рекомендовать $C_1 = 1.0$; C_2 - коэффициент, учитывающий отставание постоянной крепи от забоя выработки (рекомендуется принимать по материалам [5]); τ - расчетный промежуток времени от момента выемки породы до введения в работу постоянной крепи, сут.; t_p - время ретардации (последействия), в соответствии с [5], равно 30-40 сут.

Величину $u(q_k)$ необходимо определять, согласно [6], по формуле

$$u(q_к) = u_1 + u_2 + u_3(q_к), \qquad (12)$$

где u_1, u_2 - смещения за счет деформаций забутовочного материала и закрытия конструктивных зазоров в крепи, м; $u_3(q_k)$ - смещение, определяемое жесткостью конструкции, м.

Ориентировочно, в соответствии с [5], можно принимать

$$u_1 = 0{,}25d_3,$$

где d_3 - толщина забутовочного слоя;

$$u_2 = \frac{i\Delta}{2\pi a},$$

для сборной крепи кругового сечения, состоящей из i элементов с величиной зазоров между элементами Δ;

$$u_3(q_к) = \frac{q_к}{k_0},$$

где k_0 - коэффициент жесткости крепи, принимаемый по справочным данным для крепей линейно-нарастающего сопротивления.

В случае крепи нелинейно-нарастающего сопротивления зависимость $u_3(q_k) = f(q_k)$ может быть получена расчетным путем или с помощью прямых стендовых испытаний.

На основании первой группы предельных состояний для строительных конструкций [4] по критерию прочности в наиболее опасной точке породной оболочки условие работоспособности (надежности) примет вид

$$\sigma_\theta^{max} \le R, \qquad (12)$$

где σ_θ^{max} - расчетное напряжение в опасной точке породной оболочки от сочетаний внешнего давления и реакции крепи; R – расчетное сопротивление закрепленной породы при сжатии.

При использовании расчетных зависимостей, сформулированных ранее, с учетом условия надежности (12) определение толщины породной оболочки должно быть выполнено по следующему алгоритму.

1. Назначаются параметры нагрузки γ, H, λ. Первые два параметра принимаются по результатам инженерно-геологических изысканий и сведениям о сооружениях, находящихся на поверхности земли и воздействующих на систему К-О. Методика учета влияния строений на поверхности стандартна и рассмотрена в [7, 8]. За основное расчетное значение λ принимается условие $\lambda = 1.0$ и в отдельных неблагоприятных случаях рассматриваются величины $\lambda = 1.0 \div 0.7$.

2. Назначается величина расчетного сопротивления материала породной оболочки R. В оптимальном варианте оно может быть найдено по результатам предварительных натурных или лабораторных закреплений и испытаний на прочность исходного грунта вмещающего выработку масси-

ва. В случае невозможности прямого экспериментального определения расчетного сопротивления R необходимо вводить в расчет понижающий коэффициент надежности по материалу $\gamma_m \le 1$. Расчетное сопротивление назначается в соответствии со стандартными требованиями

$$R = \sigma_{\text{сж}} \gamma_m ,$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ - прочность породы оболочки, определяемая расчетным способом.

Если расчетным путем или экспериментально найдены значения сцепления C и угла внутреннего трения φ, то прочность породы оболочки на одноосное сжатие определяется по формуле [9, 10]

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{2C\cos\varphi}{1-\sin\varphi} .$$

3. Определяется безразмерная (относительная) прочность на сжатие материала породной оболочки

$$\sigma = \frac{R}{\gamma H \gamma_f \gamma_{\text{н}}} ,$$

где $\gamma_f, \gamma_{\text{н}}$ - нормативные коэффициенты надежности по нагрузке и условиям работы, принимаемые в соответствии с нормативными требованиями [7, 6, 8, 11] ($\gamma_f = 1{,}1 - 1{,}5$; $\gamma_н = 1{,}2 - 1{,}3$).

4. В первом приближении принимается реакция крепи, равная нулю.

5. По номограмме (рис. 3), отложив на оси ординат найденное в п. 3 значение $\overline{\sigma}$, по кривой номограммы, соответствующей принятому значению λ, находится безразмерная толщина породной оболочки δ/a.

6. Абсолютное значение толщины породной оболочки определяется умножением величины радиуса эквивалентного круглого сечения выработки в проходке a на величину δ/a, найденную в предыдущем пункте.

7. В случае необходимости учета реакции капитальной крепи q_k, расчет продолжается с использованием рекомендаций, рассмотренных ранее и формул (8-12).

8. Относительная прочность материала породной оболочки увеличивается, исходя из ранее изложенного, на величину

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{q_{\text{к}}}{\gamma H \gamma_f \gamma_{\text{н}}} \cdot \frac{1+k^2}{1-k^2} ,$$

повторяют вычисления по п. 5 и 6. В случае малых значений q_k по сравнению с вертикальной нагрузкой $q_{\text{в}} = H\gamma$ влиянием крепи можно пренебречь, что идет в запас прочности. В противоположных случаях расчет продолжается до достижения сходимости. При выполнении условия $\sigma_к \to 0$ расчет прекращается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимошенко, С.П.* Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука. Главная ред. Физ.-мат. Литературы, 1979. – 560 с.
2. *Баклашов, И.В.* Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия – М.: Недра, 1992. – 543 с.
3. *Булычев, Н.С.* Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1982. – 270 с.
4. *Булычев, Н.С.* Проектирование и расчет крепи капитальных выработок / Н.С. Булычев, Н.Н. Фотиева, Е.В. Стрельцов – М.: Недра, 1986. – 288 с.
5. *Баклашов, И.В.* Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия – М.: Недра, 1984. – 415 с.
6. СНиП II-6-74. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1975. – 60 с.
7. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки. – М.: Стройиздат, 1982. – 32 с.
8. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.
9. Строительство подземных сооружений: Справочное пособие / М.Н.Шуплик, Я.М. Месхидзе, И.О. Королева, и др.: Под ред. М.Н. Шуплика. – М.: Недра, 1990. – 384 с.
10. *Либерман, Ю.М.* Давление на крепь капитальных выработок. – М.: Наука, 1969. – 119 с.
11. *Гелескул, М.Н.* Справочник по креплению горных выработок / М.Н Гелескул, В.Н. Хорин, Е.С. Киселев, Н.П. Бушуев. – М.: Недра, 1976. – 508 с.

Авторы статьи:

Глазков Юрий Федорович - канд. техн. наук, доц. каф. «Сопротивление материалов»

Простов Сергей Михайлович – докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Рудковский Дмитрий Игоревич - ассистент каф. «Технология строительного производства»