

## ГЕОМЕХАНИКА

**УДК 622.267.33**

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

### **ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ КРЕПИ В УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**

В случаях, когда возникающие в окрестности выработки напряжения превышают прочность вмещающих выработку пород, последние ведут себя как пластическая или квазипластическая среда. Этот факт является одним из главных при моделировании механических процессов в массиве и он широко освещен в специальной литературе [1-9]. В данной работе обсуждаются наиболее важные, на наш взгляд, особенности известных решений и не рассматриваются излишние детали.

При определении параметров комбинированной крепи необходимо решить две задачи: определение параметров в предзабойной и в призабойной зонах. Первая задача решается довольно просто, основываясь на известных методиках. Решение второй задачи затруднено отсутствием подробно описанных методик. Поэтому определение параметров призабойной зоны в данной работе выполнено упрощенными инженерными методами и в дальнейшем будут предприняты шаги к уточнению этой методики.

До последнего времени в данной области математического моделирования преобладали упрощенные подходы как в выборе моделей механического поведения горных пород, так и в назначении граничных условий задачи. Так, в монографии Ю. М. Либермана [8] приведен обзор упруго-пластических решений, известных на начало 1970-х годов и показано, что все они являются развитием идей Р. Феннера.

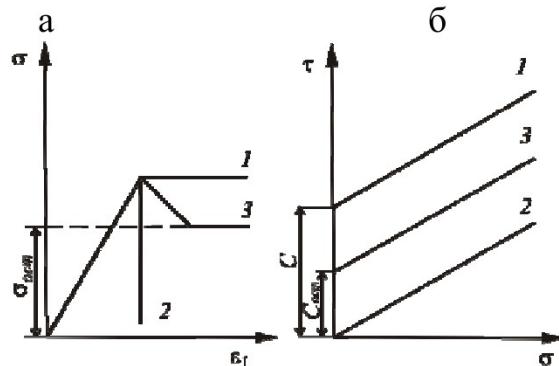
В качестве условия прочности (пластичности) обычно используется известное условие О. Мора, чаще всего в форме линейной зависимости. Уравнение связи в пластической стадии принимается, как правило, в виде условия несжимаемости.

До настоящего времени при решении упруго-пластических задач в механике горных пород аналитические методы решения остаются основными. Их возможности в отношении учета различных вариантов граничных условий ограничены, поэтому обычно рассматриваются круглые поперечные сечения выработок и гидростатическое исходное напряженное состояние массива ( $\lambda=1$ ), что приводит к одномерным математическим задачам. Попытки уточнения граничных условий задачи имели единичный характер и широкого применения в исследовательской и проектной практиках

не имели. Во многом этому способствовали особенности, присущие задачам механики горных пород: как правило, недостаточная изученность их свойств даже в пределах локальных областей отдельных месторождений; значительная неопределенность при учете исходного напряженного состояния горного массива, в частности, при назначении параметра  $\lambda$ .

Все отмеченные особенности усугубляются чрезмерными математическими сложностями, возникающими при попытках уточнить граничные условия. В конечном итоге все указанные выше соображения приводят исследователей к выводу о нерациональности чрезмерной точности решения задачи [3].

В последние два десятилетия исследования в



*Рис. 1. Типы горных пород по остаточной прочности в запредельной стадии (а) и их паспорта прочности (б)*

области изучения механических свойств горных пород (например [1, 4, 10-12]) позволили существенно углубить представления об этих свойствах и получить ряд новых решений. Эти решения базируются на вновь разработанных специальных испытательных комплексах, которые позволяют реализовывать сложные режимные нагрузления. Были освоены испытания в жестких режимах при сложных напряженных состояниях, которые позволили получить новые сведения о предельных и запредельных характеристиках некоторых типов горных пород.

Для поставленной в данном исследовании задачи, удобной является классификация типов горных пород по их поведению в запредельной об-

ласти деформирования, предложенная И. В. Баклашовым [3]. По этой классификации можно выделить два крайних типа горных пород: идеально пластические и идеально хрупкие. Первые в запредельной области деформирования не снижают прочности, у вторых она там снижается до нуля. На идеализированной индикаторной диаграмме при одноосном сжатии (рис. 1. а) этим случаям соответствуют линии 1 и 2. На рис. 1. б показаны условия прочности по О. Мору для этих случаев. В реальной действительности породы могут иметь и промежуточные свойства, которым на рис. 1 соответствуют линии 3. В последнем случае у горной породы в запредельной стадии сохраняется остаточная прочность, определяемая параметрами  $\sigma_{ост}$  и  $C_{ост}$ . Здесь уместно отметить, что еще в [8] отмечалась необходимость учета этой особенности. Однако недостаточность экспериментальных данных заставила Ю.М. Либермана решать задачу, пренебрегая остаточной прочностью. В частности, он использовал прием получения паспорта прочности горной породы в запредельной стадии путем параллельного переноса паспорта прочности неразрушенной породы в начало координат  $\sigma$ - $t$ . На рис. 1. б. этот прием соответствует огибающей 2.

Попытки использовать упруго-пластические решения основаны на потребности исследователей получать сведения не только о напряжениях и нагрузках, но и о перемещениях. Именно последнее обстоятельство, в основном, заставляет исследователей учитывать явления дилатансии и ползучести в запредельной стадии и пытаться использовать их в аналитических решениях. В последних исследованиях [3] показано, что учет всей совокупности свойств горных пород и условий их работы позволяет приблизить результаты аналитического определения смещений контура выработки к наблюдаемым в натурных условиях.

Суммируя все сказанное выше, можно сделать ряд существенных выводов.

1. Закрепленные наносы весьма слабо изучены, поскольку имеют искусственное происхождение, а их свойства неоднозначны. В исходном состоянии (до закрепления) это дисперсные, обводненные глинистые материалы, обладающие весьма малой связностью. После закрепления они фактически переходят в класс слабых твердых горных пород. Однако, имея значительное количество глинистых частиц, они должны проявлять пластические свойства. В то же время, закрепление должно, в принципе, уменьшать их пластичность и увеличивать хрупкость. Очевидно, что уточнения в этой области можно сделать только на основании экспериментальных данных.

2. Задача расчета системы «крепь-породная оболочка» (К-О), сформулированная авторами ранее, решается в режиме заданной нагрузки по критерию несущей способности. На наш взгляд, критерий смещения контура выработки в данных

условиях не будет определяющим. Поэтому нерационально излишне усложнять решение поставленной задачи чрезмерной детализацией описаний свойств закрепленной породы. В частности, это особенно относится к явлениям дилатансии и ползучести.

3. В связи с тем, что закрепленные породы обладают свойством последующего увеличения прочности во времени в течение 10-15 лет, можно утверждать, что фактический запас надежности со временем будет расти. Такая особенность решаемой задачи является еще одним обоснованием возможности ограничиваться сравнительно простыми физическими моделями среды.

Основываясь на этих выводах, примем для разработки расчетной методики физическую модель среды, предложенную Ю.М. Либерманом [8], в соответствии с которой в запредельной стадии порода сохраняет некоторую остаточную прочность, а ее паспорт прочности в этой стадии получается путем параллельного переноса огибающей (рис. 1). Такой подход позволит в дальнейшем использовать полученное решение при любой величине остаточной прочности.

Решение задачи предельного равновесия для породной оболочки выполнено при следующих граничных условиях, общепринятых в подобных задачах (рис.2): круговая цилиндрическая породная оболочка нагружена внешним гидростатическим давлением ( $\lambda=1$ ,  $q_\theta=q_\varphi=q$ ) и подкреплена капитальной крепью с несущей способностью  $q_k$ , реализуемой в виде равномерной нагрузки, приложенной к внутреннему контуру оболочки. Работу системы К-О схематично можно представить следующим образом: породная оболочка приходит в состояние предельного равновесия, при этом она воспринимает некоторую часть внешней нагрузки  $q$ . Оставшуюся часть этой нагрузки породная оболочка передает на крепь в виде нагрузки  $q_k$ . Надо найти такое соотношение параметров породной оболочки, при котором нагрузка на крепь станет равна ее несущей способности.

Прочность породы в запредельной стадии описывается прямой 3 на рис. 1б, определяемой остаточным сцеплением  $C_{ост}$  и углом внутреннего трения  $\varphi$ , равным его значению в допредельном состоянии. Согласно [9] состояние породной оболочки описывается уравнением равновесия

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

и уравнением предельного состояния

$$\sigma_r - \sigma_\theta = A\sigma_r + B, \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  – характеристики паспорта прочности породы в запредельной стадии работы материала, определяемые по зависимостям

$$A = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad B = \frac{2C_{ост} \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

Решение должно быть найдено для следующих граничных условий при  $r=b$ ,  $\sigma_r=q$ ; при  $r=a$ ,  $\sigma_r=q$ .

Подставив выражение (2) в дифференциальное уравнение (1) и проводя интегрирование путем разделения переменных, получим

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{A\sigma_r + B}{r}, \quad \int_{q_k}^{\sigma_r} \frac{\partial \sigma_r}{A\sigma_r + B} = \int_a^r \frac{dr}{r},$$

$$\frac{1}{A} \ln \frac{A\sigma_r + B}{Aq_k + B} = \ln \frac{r}{a}.$$

Окончательно имеем

$$\frac{A\sigma_r + B}{Aq_k + B} = \left( \frac{r}{a} \right)^A.$$

Преобразуем полученный результат к формам, удобным для решения последующих двух задач. В случае если задана капитальная крепь и известна ее несущая способность  $q_k$ , то толщина породной оболочки может быть найдена из выражения

$$\delta = a \left[ \left( \frac{Aq + B}{Aq_k + B} \right)^{\frac{1}{A}} - 1 \right]. \quad (3)$$

Если известной считается толщина породной оболочки, то находим расчетную нагрузку на крепь, которая используется при ее проектировании, по формуле

$$q_k = \frac{Aq + B \left[ 1 - \left( \frac{b}{a} \right)^A \right]}{A \left( \frac{b}{a} \right)^A}. \quad (4)$$

Если принять в первом приближении, что остаточная прочность равна нулю, т.е.  $C_{ost}=0$  и  $B=0$ , то формулы (3) и (4) примут более простой вид

$$\delta = a \left[ \left( \frac{q}{q_k} \right)^{\frac{1}{A}} - 1 \right]; \quad q_k = q \left( \frac{a}{b} \right)^A. \quad (5)$$

Решение обеих сформулированных выше задач (подбора толщины породной оболочки при заданной реакции крепи и нахождения нагрузки на крепь при заданной толщине породной оболочки) может быть выполнено по сходным алгоритмам.

При подборе толщины породной оболочки  $\delta$  выполняется следующее.

1. Задаются конструкцией крепи и определяют ее несущую способность  $q_k$ . Этот этап обычно выполняется расчетными методами в соответствии с известными нормативными источниками по

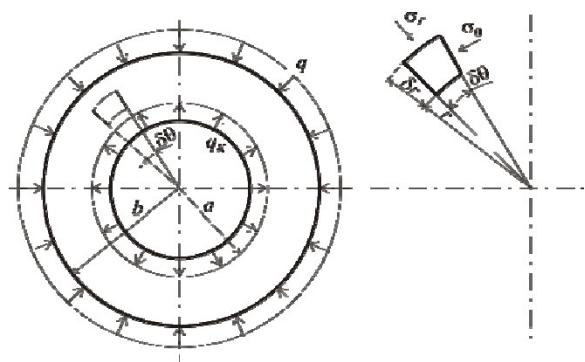


Рис. 2. Упруго-пластическая схема работы породной оболочки

расчету крепей капитальных горных выработок [13-15]. В принципе, возможен путь решения с помощью экспериментального определения несущей способности по результатам стендовых испытаний крепи, типа описанных в [7].

2. Определяется величина расчетной вертикальной нагрузки по стандартным методикам [14, 15]  $q = \gamma H \gamma_f \gamma_n$ .

3. Определяется относительная (безразмерная) величина несущей способности капитальной крепи  $q_k/q$ .

4. Назначаются характеристики прочности неразрушенной породной оболочки –  $C_{закр}$ ,  $\varphi$ ,  $\sigma_{сж}$ .

5. Назначается величина остаточной прочности материала породной оболочки в запредельной стадии работы –  $C_{ост}$ ,  $\sigma_{ост}$ . В настоящее время дать надежные рекомендации при выполнении этого этапа достаточно сложно. Однако из общих соображений можно утверждать, что реальные закрепленные глинистые наносы будут обладать значительной остаточной прочностью, по-видимому, не менее половины от ее исходного значения. Подтверждением этому соображению служит тот факт, что в известной авторам методике расчета оболочки в призабойной зоне П. Н. Должикова [16], используются единые характеристики прочности без разделения на допредельные и запредельные (остаточные).

6. По формуле (3) определяется толщина крепи  $\delta$ . Отметим, что характер зависимости толщины породной оболочки от относительной несущей способности крепи одинаков для разных вариантов исходных данных. Так при увеличении несущей способности крепи толщина породной оболочки стремится к нулю. Известно, что нормативные значения угла внутреннего трения глинистых грунтов лежат в интервале от  $5^\circ$  до  $30^\circ$  [17]. Для иллюстрации отмеченной зависимости была построена nomogramma зависимости безразмерной толщины породной оболочки от относительной величины несущей способности крепи при  $C_{ост}=0$  и  $B=0$  (рис.3).

Если задана толщина породной оболочки  $\delta$ , то

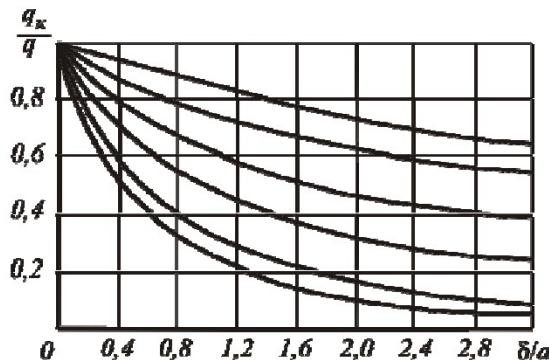


Рис. 3. Зависимость между несущей способностью крепи и толщиной породной оболочки по упруго-пластической схеме

определение расчетной нагрузки на капитальную крепь должно выполняться в следующем порядке, при  $C_{ostm} = 0$ :

1. Задается толщина породной оболочки  $\delta$ .
2. Аналогично п. (2) предыдущего алгоритма

назначается расчетная нагрузка  $q$ .

3. Назначаются расчетные характеристики прочности материала породной оболочки в допредельной и запредельной стадиях по рекомендациям, обсужденным в п. 4, 5 предыдущего алгоритма.

4. По формулам (4), (5) или номограмме на рис. 3 определяется относительная нагрузка  $q_k/q$  на капитальную крепь, а затем и ее абсолютное значение  $Q_K$ .

5. По найденной расчетной нагрузке на крепь по обычным методикам [14, 15] производится рас-

чет и конструирование крепи.

Для породной оболочки в призабойной зоне необходимо найти два ее размера:

- толщину  $\delta_3$  незакрепленного участка выработки, которая образуется за счет естественного отставания возводимой капитальной крепи на величину  $l_0$ ;

- толщину оболочки  $\delta_{3e}$  впереди забоя, которая фактически является перемычкой, предотвращающей прорыв массы незакрепленного грунта в забойную зону.

Определение толщины породной оболочки  $\delta_3$  в призабойной зоне можно выполнить в соответствии с решением, приведенным в работе [16] и уже упоминавшимся ранее. Предложено уточнение этой методики, которое позволяет учесть несущую способность трубчатых электродов. Как показывают исследования [18], после проведения закрепления оболочки трубы-электроды уменьшают свою массу и поперечное сечение незначительно.

В этом случае общую нагрузку, приложенную к системе К-О в призабойной зоне, можно разделить на две части: воспринимаемую трубами-электродами  $q_{ue}$  и воспринимаемую породной оболочкой в призабойной зоне  $q_{no}$

$$q = q_{ue} + q_{no}$$

Определение доли нагрузки, воспринимаемой трубами-электродами, можно выполнить в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 4.

Нагрузка, воспринимаемая трубами-электродами, может быть найдена из расчетной

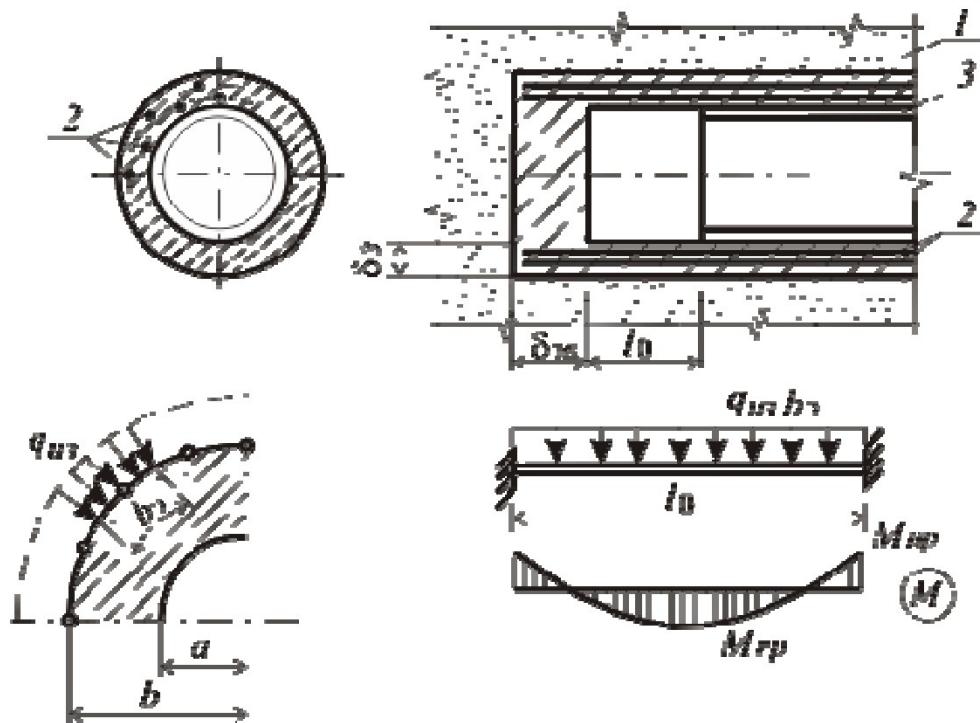


Рис. 4. Расчетная схема породной оболочки (а) и труб электродов (б) в призабойной зоне:  
1—незакрепленный грунт; 2—электроды; 3—капитальная крепь.

схемы заделанной по концам балки, загруженной равномерной нагрузкой. Для определения несущей способности трубы-электрода рекомендуется использовать расчет изгибающего элемента по схеме предельного равновесия с образованием трех пластических шарниров [19]. В этом случае доля общей нагрузки, воспринимаемая трубой-электротом находится по формуле

$$q_{iz} = \frac{16RW_{np}\gamma_{ne}}{l_0^2 b_3},$$

где  $R$  – расчетное сопротивление материала трубы, определяемое по соответствующим нормативным источникам;  $W_{np}$  - пластический момент сопротивления поперечного сечения трубы-электрода, назначаемый в соответствии с [19];  $b_3$  - ширина грузовой площади одной трубы-электрода в соответствии с рис. 4;  $\gamma_{ne}$  - коэффициент надежности по условиям работы электрода, учитывающий уменьшение его сечения ( $\gamma_{ne} = 0.85 - 0.90$ ).

Ширина грузовой площади одной трубы-электрода определяется по формуле

$$b_3 = \frac{2\pi b}{N_3},$$

где  $N_3$  - общее количество труб-электролов, расположенных в поперечном сечении породной оболочки в призабойной зоне.

Пластический момент сопротивления для тонкостенной трубы при малой величине толщины трубы  $\delta_3$  по сравнению с внешним диаметром трубы  $d_3$  ( $\delta_3 \leq 0.1 d_3$ ) можно найти по приближенной зависимости [19]

$$W_{np} = d_3^2 \delta_3.$$

После нахождения  $q_{iz}$ , определяется доля нагрузки, воспринимаемая породной оболочкой

$$q_{po} = q - q_{iz},$$

которую используют для поиска  $\delta_3$  [16]

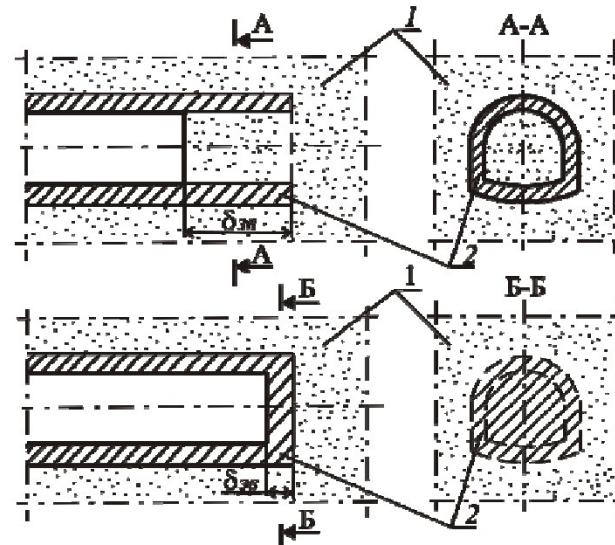


Рис. 5. Схемы закрепления грунта впереди забоя  
1-незакрепленный грунт; 2-закрепленный грунт

$$\delta_3 = \frac{q_{po} l_0}{2\tau} - a + \sqrt{\frac{(q_{po} l_0)^2}{4\tau^2} + a^2},$$

где  $l_0$  - отставание капитальной крепи от забоя выработки;  $\tau$  - прочность закрепленной породы на сдвиг,

$$\tau = C + q_{po} \tan \varphi.$$

Определение толщины породной перемычки  $\delta_{\text{шв}}$  впереди забоя выработки необходимо находить в зависимости от принятой технологии закрепления грунта в этой зоне. Здесь возможны следующие два варианта:

- грунт закрепляется только в зоне оболочки (рис. 5. а), а роль перемычки выполняет незакрепленный грунт;

- закрепление грунта производится по всей площади забоя выработки с образованием перемычки из закрепленных пород (рис. 5. б)

Первая схема закрепления может быть применима при сравнительно прочных незакрепленных грунтах с большими величинами  $C$  и  $\varphi$ , при отно-

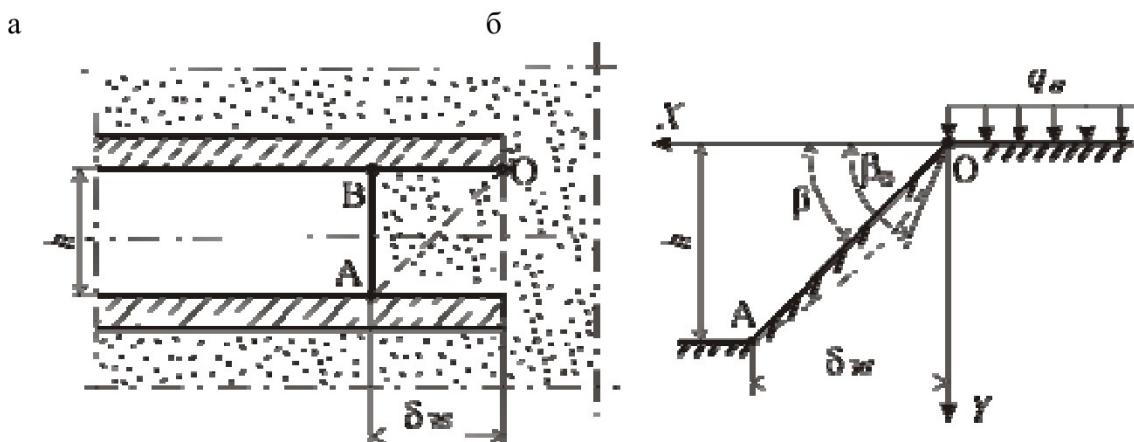


Рис. 6. Схема для определения толщины грунтовой пробки

сительно больших углах наклона оси выработки к горизонту. Когда эти условия отсутствуют, должна применяться вторая схема.

Для расчета по первому варианту используем известные методики расчета толщины тампонажных подушек [20, 21]. Перемычка работает на изгиб по схеме толстой плиты, а давление от нее передается на цилиндрическую оболочку из закрепленного грунта. Характер работы перемычки зависит от соотношения ее толщины  $\delta_{3B}$  и радиуса контура  $a$  (радиуса выработки в проходке).

При  $\frac{\delta_{3B}}{a} \leq 1$  толщину перемычки необходимо

определить из схемы изгиба по формуле

$$\delta_{3B} = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{3\mu q_g}{\sigma_{изг}}} (3 + \mu),$$

где  $q_g$  - расчетное вертикальное давление грунта;  $\sigma_{изг}$  - предел прочности закрепленного грунта при изгибе (в соответствии с рекомендациями [20]:  $\sigma_{изг} = 0,17\sigma_{сж}$ ).

При  $\frac{\delta_{3B}}{a} > 1$  перемычка разрушается срезом по поверхности, совпадающей с внутренним контуром породного цилиндра. Тогда толщина перемычки определяется по зависимости:

$$\delta_{3B}^{cp} = \frac{aq_g}{2\tau_{cp}} = 1,67a \frac{q_g}{\sigma_{сж}},$$

где  $\tau_{cp}$  - сопротивление материала перемычки срезу  $\tau_{cp} = 0,3\sigma_{сж}$  в соответствии с [21].

При определении толщины грунтовой пробки по второй схеме (отсутствие закрепления) можно использовать решения теории предельного равновесия грунтовой массы [22]. Толщину грунтовой пробки можно определить как заложение откоса из связного грунта, по горизонтальному обрезу которого приложена вертикальная нагрузка (рис. 6), равная вертикальному давлению в массиве на уровне забоя выработки:

$$q_B = \gamma H \gamma_f \gamma_n$$

Отказ от учета веса грунта в пределах откоса, пригруза откоса призмой грунта ОАВ (рис. 6а) и наклона оси выработки к горизонту будет идти в запас прочности. В соответствии с [22], поверхность равнустойчивого откоса связного грунта является криволинейной цилиндрической поверхностью сложной формы, определяемой численными методами.

При назначенных значениях  $\varphi$  и  $C$  определяется  $q_B$  и величина угла наклона откоса  $\beta_0$  в точке О (рис. 6 б) по формуле:

$$q_B = C \operatorname{ctg} \varphi \left[ \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{(\pi - 2\beta_0) \operatorname{tg} \varphi} - 1 \right].$$

$$\beta_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \varphi \ln \left[ \left( q_B \frac{\operatorname{tg} \varphi}{C} + 1 \right) \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right],$$

При вычислениях должно выполняться условие  $0 \leq \beta_0 \leq \frac{\pi}{2}$ .

Величину заложения равнустойчивого откоса  $\delta_{3B}$  при известных значениях  $h$ ,  $\beta_0$ ,  $\varphi$  можно определить по nomogrammам, взятым из [22].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Баклашов, И.В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия – М.: Недра, 1984. – 415 с.
3. Баклашов, И.В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия – М.: Недра, 1992. – 543 с.
4. Баклашов И.В. Механика горных пород / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
5. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1982. – 270 с.
6. Булычев, Н.С. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок / Н.С. Булычев, Н.Н. Фотиева, Е.В. Стрельцов – М.: Недра, 1986. – 288 с.
7. Ерофеев Л.М., Мирошникова Л.А. Повышение надежности крепи горных выработок / Л.М. Ерофеев, Л.А. Мирошникова. – М.:Недра, 1998. – 245 с.
8. Либерман Ю.М. Давление на крепь капитальных выработок. – М., 1996. – 119 с.
9. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев, А.Б. Фадеев. – М.:Недра, 1979. – 269 с.
10. Ставрогин А.Н. Пластичность горных пород / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1992. – 224 с.
11. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
12. Ставрогин А.Н. Механика деформирования и разрушения горных пород / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1992. – 224 с.
13. 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.
14. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки.– М.: Стройиздат, 1982. – 32 с.
  15. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИОМШС 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.: Вышш. школа, 1991. – 383 с.
  18. Джасани Л.Г. Изменение главнейших физико-механических свойств торфов Колхида 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  $q_v$  и горизонтальных  $q_e$  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 «каркасная 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  $q_e$  и  $q_v$ , реакция крепи моделируется внутренним давлением  $q_k$ .

Определение напряжений и перемещений в породной оболочке производится по схеме Г. Кирша [1]. В соответствии с этим решением при  $\lambda=0$  (отсутствует боковое давление) вертикальное давление можно разделить на две компоненты: осесимметричную (гидростатическую)  $q_0 = 0.5q_v$  (рис. 2, а); кососимметричную  $q^* = 0.5 q_v$ . По-

следняя сила в свою очередь может быть разложена на нормальную  $q_{n*} = 0.5q_v \cos 2\theta$  и касательную  $q_{\tau*} = -0.5q_v \sin 2\theta$  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  $q^*$ :

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