Ордена Трудового Красного Знамени
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА
имени А.А. Скочинского

В. И. БАРАНОВСКИЙ, М. И. ВЕСКОВ,
А. Я. ГРАФОВА, С. Н. ВЫБОРНОВА

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СМЕЩЕНИЯ КОНТУРА КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

МОСКВА
1975

gost.e-ecolog.ru

Министерство угольной промышленности СССР
Академия наук СССР
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт горного дела им. А. А. Скочинского

Лаборатория
горного давления

Утверждена
директором института
проф., докт. техн. наук
А. В. Докукиным
20 декабря 1974 г.

Докт. техн. наук В. И. БАРАНОВСКИЙ,
докт. техн. наук М. И. ВЕСКОВ,
канд. техн. наук А. Я. ГРАФОВА,
инж. С. Н. ВЫБОРНОВА

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СМЕЩЕНИЯ КОНТУРА КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

Москва
1975

УДК 622.834 : 622.272.3

В работе изложен метод расчета напряженно-деформированного состояния горного массива вокруг капитальных выработок, пройденных по породам, склонным к пучению.

Расчетный метод, основанный на теории вязко-пластического течения горных пород, позволяет заранее определить ожидаемую величину пучения пород в капитальных выработках в любой момент времени.

Зная величину смещения вмещающих пород, можно выбрать такой тип крепи, который обеспечит устойчивость выработки в течение срока эксплуатации.

Разработанная методика предназначается для использования в проектных институтах Минуглепрома СССР.

© Институт горного дела им А. А. Скочинского (ИГД им. А. А. Скочинского), 1975.

ВВЕДЕНИЕ

Высокие темпы развития угольной промышленности обусловливаются резким повышением нагрузки на очистной забой и концентрацией горных работ на базе комплексной механизации и автоматизации производственных процессов.

Для решения указанных вопросов необходимо обеспечить устойчивость горных выработок. Устойчивость выработки – это сохранение в течение заданного промежутка времени необходимых размеров и формы ее поперечного сечения в соответствии с требованиями правил технической эксплуатации и техники безопасности.

При высокой концентрации горных работ выход из строя одной из выработок может привести к значительной потере добычи угля и в конечном счете снижению технико-экономических показателей работы шахты.

Проблема обеспечения устойчивости горных выработок приобретает особенно большое значение при разработке угольных пластов в тяжелых горногеологических условиях (при большой глубине залегания пластов и наличии вмещающих пород, склонных к пучению).

Глубокими в Донецком бассейне считаются шахты, разрабатывающие пологие пласты на начальной глубине вентиляционного горизонта свыше 600 м и крутые – на глубине 700 м [I]. В настоящее время в бассейне уже 82 шахты разрабатывают угольные пласты на глубоких горизонтах.

Для выбора мероприятий, обеспечивающих устойчивость выработки, необходимо знать величину деформаций вмещающих пород за весь срок существования выработки. Вопрос прогнозирования величины деформаций вмещающих пород особенно актуален для капитальных выработок, так как при больших деформациях пород в этих выработках применяется крепь замкнутой конструкции, стоимость которой на 30–40% выше обычной.

Опыт строительства глубоких шахт ("Щегловка-Глубокая", имени Бажанова, "Мушкетовская-Заперевальная" № 2 и другие) показал, что еще на стадии строительства крепи из монолитного бетона и сборного железобетона в капитальных выработках были деформированы и полностью заменены. Расходы по перекреплению капитальных выработок только на шахте "Щегловка-Глубокая" составили I млн. руб в год [2].

Следовательно, необходимы эффективные меры для обеспечения нахождения горных выработок в рабочем состоянии за весь срок службы.

В соответствии с предложенной терминологией [2-4] к капитальным выработкам относятся выработки околоствольного двора, а также капитальные и этажные квершлаги.

В ИГД им.А.А.Скочинского в 1972 г. разработан расчетный метод, основанный на теории вязко-пластического течения горных пород, позволяющий заранее определить ожидаемую величину смещения пород в выработках типа квершлага в любой промежуток времени.

Зная величину смещения вмещающих пород, можно выбрать такой тип крепи и способ охраны выработки, которые обеспечат ее устойчивость в течение срока эксплуатации.

Сопоставление расчетных величин деформаций пород в квершлагах глубоких шахт, полученных по предлагаемому в настоящей работе методу, с результатами натурных наблюдений показало удовлетворительную сходимость; отклонение составило не более 20%.

I. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОРОД В КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Анализ стратиграфических разрезов шахтопластов показал, что пласты тонкие и средней мощности характеризуются слоистым строением горного массива и существенным изменением прочностных свойств пород. Непосредственная кровля, почва, а иногда и то и другое большинства угольных пластов представлены слабыми породами. В определенных условиях при пересечении слоев квершлагами возникает процесс пучения пород [5].

Пучение пород является временным процессом и характеризуется тем, что интенсивность напряжений пород равна или превышает предел их текучести.

Существующие методы расчета напряженно-деформированного состояния горного массива в зоне расположения капитальных выработок базируются на основных положениях теорий упругости [6, 7], пластичности [8,9] и наследственной ползучести [10,11].

Однако теории упругости и пластичности, не учитывающие фактор времени, не могут быть положены в основу метода расчета напряженно-деформированного состояния массива вокруг капитальных выработок, пройденных по слабым породам. Решения с применением наследственной теории ползучести, в которых деформации массива рассматриваются как вязко-упругие или упруго-пластические, а время учитывается через временные операторы, также не дают величин смещений, соизмеримых с натурными.

При проведении выработки в слое слабых пород возникает пластическая зона, поэтому характер деформирования пород вокруг выработок будет определяться в основном их течением.

Пучение пород в капитальных выработках рассматривалось как процесс вязко-пластического течения и описывалось реологической моделью, учитывающей вязкие и пластические свойства пород [12]. Достоинствами такой модели следует считать возможность определения величины пучения пород как за весь срок службы выработки, так и за отдельные моменты времени посредством введения величины скорости течения пород V_0 .

Известные уравнения движения механики сплошной среды имеют вид

$$\frac{\partial V_x}{\partial t}+V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_x}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_x}{\partial z}=X+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right);(x,y,z),(I.I)$$

где x, y, z – координаты;

V_x, V_y, V_z – скорость течения частиц горного массива в направлении соответственно координат x , y , z ;

t – текущее время;

X, Y, Z – инерционные члены уравнения, учитывающие силы веса;

ρ – плотность пород;

$\sigma_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ – величины напряжения.

Символы x , y , z используются для круговой подстановки величин x , y , z , в результате чего получаются остальные два уравнения движения механики сплошной среды.

При исследовании течения пород в окрестности капитальных выработок, сечения которых обычно близки к круговым, целесообразно пользоваться полярными координатами. Тогда уравнение течения горных пород будет иметь вид

$$\rho\left(\frac{\partial V_r}{\partial t}+V_r\frac{\partial V_r}{\partial r}+\frac{V_\theta}{r}\frac{\partial V_r}{\partial \theta}+V_z\frac{\partial V_r}{\partial z}-\frac{V_\theta^2}{r}\right)=\rho F_r+\frac{\partial \sigma}{\partial r}+$$

$$+\eta\left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2}+\frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial r}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial V_\theta}{\partial \theta}-\frac{V_r}{r^2}\right)+ \qquad (I.2)$$

$$+2\frac{\partial V_r}{\partial r}\frac{\partial \eta}{\partial r}+\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial V_r}{\partial \theta}+\frac{1}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial r}-\frac{V_\theta}{r^2}\right)\frac{\partial \eta}{\partial \theta}+\left(\frac{\partial V_z}{\partial r}+\frac{\partial V_r}{\partial z}\right)\frac{\partial \eta}{\partial z};$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial \theta}+\frac{\partial V_z}{\partial z}+\frac{V_r}{r}=0.$$

Остальные два уравнения получаются в результате круговой подстановки r , θ , z .

Особенностью расчетных схем, принимавшихся ранее при исследовании проявлений горного давления в капитальных выработках с привлечением методов механики сплошной среды, является аппроксимация горного массива изотропной средой при сечении его вертикальной плоскостью. В действительности квершлаги пересекают слои пород различного литологического состава, и для того, чтобы окружающие их породы можно было аппроксимировать изотропной средой, необходимо секущие плоскости проводить в плоскости слоев.

Обычно квершлаги проходятся круглого сечения или близкого к нему, поэтому в расчетных схемах для определения смещения пород в капитальной выработке (рис. I) принимается круглое сечение.

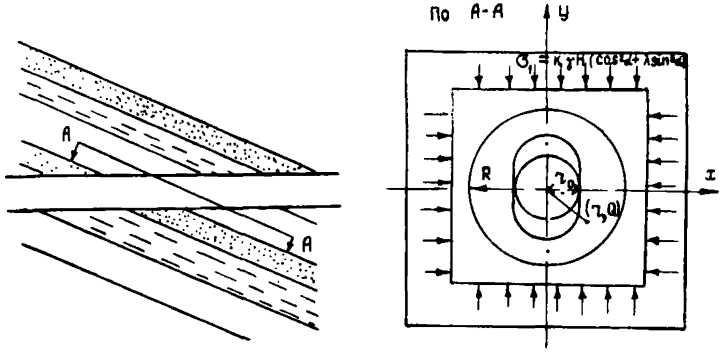

Рис. I. Расчетная схема определения смещения пород в капитальной выработке

Тогда в плоскости сечения выработки получится эллипс, одна ось которого равна радиусу выработки, а вторая – радиусу, деленному на синус угла, под которым залегают слои породы.

Решение асимметричных задач, как известно, представляет собой большие трудности. В данном случае их можно избежать путем введения конформно отображающих функций и вследствие этого перейти от эллипса к кругу. Однако такой подход, приводящий к громоздким и сложным математическим выкладкам, для рассматриваемой задачи малоцелесообразен, так как получаемая при этом большая точность решения все равно сведется на нет из-за большого разброса исходных данных. В то же время, как показывают инструментальные наблюдения в шахтах, смещения пород в квершлагах даже при пересечении ими слоев пород, залегающих под малым углом к горизонту, являются почти симметричными.

В связи с этим целесообразно в расчетной схеме для определения смещений эллипс аппроксимировать кругом. Как показал анализ горногеологических условий, слои пород, склонных к пучению, обычно имеют мощность не более 5–10 м и залегают среди прочных пород. Следовательно, для реальной обстановки расчетная схема сводится к схеме слоя с круглым отверстием, находящегося между более прочными слоями пород и подвергаемого давлению, величина которого определяется глубиной разработки и углом падения. К контуру выработки приложена радиальная сила, которая определяется в зависимости от характеристики крепи.

При осесимметричной задаче частицы горного массива будут двигаться в направлении начала координат, которое по расчетной схеме располагается в центре выработки. Каждая частица в общем случае имеет три составляющих скорости движения: осевую V_z, тангенциальную V_θ и радиальную V_r. Ввиду того что изменение толщины слоя незначительно, с достаточной для практики точностью можно допустить, что в направлении оси выработки скорость движения частиц пучащего слоя V_z равна нулю. В силу осевой симметрии тангенциальная составляющая скорости отсутствует, а радиальная составляющая может изменяться только вдоль оси r.

В принятой расчетной схеме поле скоростей частиц пучащего слоя будет определяться равенствами

$$V_r = V_r(r); \quad V_\theta = 0; \quad V_z = 0. \qquad (I.3)$$

Согласно выражениям (I.3) непрерывное течение частиц горных пород должно удовлетворять уравнению неразрывности, которое приобретает следующий вид:

$$\frac{dV_r}{dr} + \frac{V_r}{r} = 0 . \qquad (I.4)$$

Общее решение этого уравнения можно представить в виде

$$V_r = \frac{c}{r} . \qquad (I.5)$$

Произвольная постоянная определяется из граничного кинематического условия: при текущем радиусе r, равном радиусу выработки r_0, радиальная скорость V_r равна скорости на контуре выработки V_0.

При этом произвольная постоянная равна

$$c = V_0 r_0 . \qquad (I.6)$$

Тогда изменение радиальной скорости происходит по закону

$$V_r = \frac{V_0 r_0}{r} . \qquad (I.7)$$

Как следует из уравнения (I.7), частицы горной породы слоя в радиальном направлении движутся с все возрастающей скоростью.

Уравнения связи между скоростями деформаций в общем виде записываются следующим образом:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial V_r}{\partial r} ; \qquad \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r} ;$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} ; \quad \varepsilon_{\theta z} = \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial V_z}{\partial \theta} ; \qquad (I.8)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z} ; \qquad \varepsilon_{zr} = \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} .$$

Учитывая принятые выше допущения и подставляя в уравнение (I.8) значения радиальной скорости и ее производных из уравнения (I.7), получаем выражение для определения скоростей деформаций:

$$\varepsilon_{rr} = -\frac{V_0 r_0}{r^2} . \qquad (I.9)$$

Интенсивность скоростей деформаций определяется из выражения

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{2}{3}\frac{V_0 r_0}{r^2}, \qquad (I.10)$$

Используя уравнение

$$\eta = \frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i},$$

где η – коэффициент вязкости;

σ_i – интенсивность напряжения,

и принимая $\sigma_i = \sigma_s$ с учетом уравнения (I.10), получаем

$$\eta = \frac{1}{2}\frac{\sigma_s r^2}{V_0 r_0}, \qquad (I.11)$$

где σ_s – величина предела текучести пород.

Известно, что процесс пучения пород в капитальных выработках протекает с достаточно малой скоростью, поэтому величиной инерционных сил в уравнении (I.2) можно пренебречь.

На основании выражений (I.2) и (I.11) получаем уравнение движения в следующем виде:

$$-\frac{\partial \sigma}{\partial r} = \eta\left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2}\right) + 2\frac{\partial \eta}{\partial r}\cdot\frac{\partial V_r}{\partial r}. \qquad (I.12)$$

Из этого уравнения определяем V_r. Как видно из выражения (I.11), коэффициент пластической вязкости η не является величиной постоянной, а зависит от предела текучести пород, скорости течения и значений координат, что усложняет решение задачи определения величины деформации пород в капитальных выработках.

Проведенные лабораторные исследования реологических свойств пучащих пород показали, что скорость течения их в тех диапазонах, которые характерны для капитальных выработок, мало влияет на коэффициент вязкости η, зависящий в основном от времени t. Поэтому при определении V_r для упрощения расчетов коэффициент вязкости может приниматься в пределах пластической зоны переменным только во времени.

В уравнении (I.I2) величина второй производной при значениях скоростей смещения пород, наблюдаемых в горных выработках, очень незначительна, поэтому ею можно пренебречь.

После принятых допущений уравнение (I.I2) будет иметь вид

$$-\frac{\partial \sigma}{\partial r}=\eta\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial r}-\frac{V_r}{r^2}\right)$$

или

$$-\partial\sigma=\eta\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial r}-\frac{V_r}{r^2}\right)\partial r. \qquad (I.I3)$$

Учитывая вид этого уравнения, можно частную производную $\frac{\partial \sigma}{\partial r}$ заменить на $\frac{d\sigma}{dr}$. Проинтегрировав уравнение (I.I3), получим

$$-\sigma_i=\eta\left(\frac{3V_r}{2r}\right)+c. \qquad (I.I4)$$

Определим произвольно-постоянную c. Если $r=r_0$, а $V_r=V_0$,

то $c=\sigma_i+\frac{3\eta V_0}{2r_0}$.

Подставив значение c в уравнение (I.I4), найдем

$$-2\sigma_i=\eta\left(\frac{3V_r}{2r}+\frac{3V_0}{2r_0}\right), \qquad (I.I5)$$

где $V_r=\frac{V_0 r_0}{r}$.

Решив уравнение (I.I5) относительно V_0, получим

$$V_0=\frac{4\sigma_i\cdot r^2\cdot r_0}{3(r_0^2+r^2)\cdot\eta}. \qquad (I.I6)$$

Величина напряжения σ_i, входящая в уравнение (I.I6), определится из выражения

$$\sigma_i=\sigma_1-\sigma_{rr}, \qquad (I.I7)$$

где σ_1 – напряжение, действующее в массиве, равное

$$\sigma_1=k\gamma H(\lambda\sin^2\alpha+\cos^2\alpha);$$

σ_{rr} – радиальное напряжение на контуре выработки.

Значение σ_{rr} определяется из уравнения (I.I2) подстановкой в него

$$V_r = \frac{V_0 r_0}{r} \quad \text{и} \quad \eta = \frac{1}{2} \frac{\sigma_s r^2}{V_0 r_0}.$$

Произведя подстановку, получим

$$-\frac{d\sigma}{dr} = -2\frac{\sigma_s}{r}. \qquad (I.I8)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$\sigma = 2\sigma_s \ln r + c. \qquad (I.I9)$$

Для определения постоянной c используем выражение, описывающее все поле напряжений в криволинейных координатах:

$$\begin{cases} \sigma_{q_1 q_2} = \sigma + 2\eta \cdot \varepsilon_{q_1 q_2} \\ \sigma_{q_2 q_1} = \eta \cdot \varepsilon_{q_2 q_1}, \end{cases} \qquad (I.20)$$

где q_1, q_2 – криволинейные координаты.

Используя уравнения (I.9) и (I.II) и заменяя $\sigma_{q_1 q_2}$ на σ_{rr}, получаем

$$\sigma_{rr} = 2\sigma_s \ln r + c - \sigma_s. \qquad (I.2I)$$

Для определения постоянной c примем, что $r = r_0$, $\sigma_{rr} = q$ (значение r меняется от r_0 до R – радиуса пластической зоны), и тогда получим

$$c = \sigma_s - 2\sigma_s \ln r_0 + q. \qquad (I.22)$$

Следовательно, выражение (I.2I) будет иметь вид

$$\sigma_{rr} = 2\sigma_s \ln \frac{R}{r_0} + q. \qquad (I.23)$$

Подставив в уравнение (I.I6) значения σ_{rr} и σ_1, получим окончательное уравнение для определения скорости смещения пород:

$$V_0 = \frac{4\left[k\gamma H(\lambda \sin^2\alpha + \cos^2\alpha) - 2\sigma_s \ln \frac{R}{r_0} - q\right] R^2 r_0}{3(r_0^2 + R^2)\cdot \eta_t}, \qquad (I.24)$$

где K – коэффициент концентрации напряжений; для обычных сечений квершлагов и неустойчивых пород его можно принимать равным I,2;

γ – объемный вес вышележащих пород; для угольных месторождений $\gamma = 2{,}5$ тс/м^3;

α – угол падения пласта, град;

r – текущая координата ($R \geq r \geq r_0$), м;

r_0 – радиус выработки, м;

η – коэффициент вязкости, тс/м^2·сут;

H – глубина разработки, м;

σ_s – предел текучести пород слабого слоя, тс/м^2;

R – радиус пластической зоны, м;

λ – коэффициент бокового распора пород.

Для определения величины смещения пород за время t выражение (I.24) следует проинтегрировать в пределах $0 - t$, тогда получим

$$W = \int_0^t V_0 dt . \qquad (I.25)$$

2. ПОЛУЧЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ СМЕЩЕНИЯ ПОРОД НА КОНТУРЕ ВЫРАБОТКИ

Величины γ , H , r_0 , α , q , входящие в уравнение (I.24), принимаются в соответствии с проектными данными. Величина предела текучести σ_s и коэффициент вязкости η определяются в результате реологических испытаний пород. При отсутствии таких данных они могут быть найдены по формулам, полученным после обработки экспериментальных данных.

Лабораторные исследования реологических свойств горных пород показали, что между пределом текучести σ_s и прочностью на одноосное сжатие $\sigma_{сж}^{обр}$ существуют следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= (0{,}25 \div 0{,}3)\, \sigma_{сж}^{обр} && \text{для аргиллитов;} \\ \sigma_s &= (0{,}3 \div 0{,}35)\, \sigma_{сж}^{обр} && \text{для алевролитов;} \\ \sigma_s &= (0{,}37 \div 0{,}43)\, \sigma_{сж}^{обр} && \text{для песчаников.} \end{aligned} \qquad (2.I)$$

При этом следует иметь в виду, что определенную в результате лабораторных исследований величину предела прочности на одноосное сжатие при выполнении расчетов необходимо умножить на коэффициент K, учитывающий структурное ослабление пород $K_м$ и их длительную прочность K_q .

Тогда предел прочности на одноосное сжатие составит

$$\sigma_{сж}^{м} = \sigma_{сж}^{обр} \cdot K ,$$

где $K = K_м \cdot K_q$; $K_q = K_м = 0{,}7$ (по данным ВНИМИ);

$\sigma^{м}_{сж}$ – предел прочности на сжатие в массиве;

$\sigma^{обр}_{сж}$ – предел прочности на сжатие пород в образце.

Коэффициент вязкости пород в любой момент времени определяется по формуле

$$\eta(t) = 10^{\kappa}\left(\eta_0 + \frac{t}{a+\beta t}\right), \qquad (2.2)$$

где $\eta(t)$ – коэффициент вязкости горной породы в момент времени t;

η_0 – коэффициент вязкости при $t \to 0$;

κ – порядок степени η;

a, β – размерные коэффициенты.

Значения коэффициентов η_0, a, β и κ для различных типов пород (в зависимости от предела прочности на одноосное сжатие) приведены в табл. I.

Таблица I

Предел прочности породы на одноосное сжатие $\sigma^{обр}_{сж}$, тс/м^2	η_0, тс/м^2.сут	a, м^2/тс	β, м^2/сут·тс	κ
I000	0,8	0,80	0,200	5
2000	0,2	I,70	0,300	6
3000	0,4	0,70	0,200	6
4000	0,8	0,50	0,I00	6
5000	I,6	0,40	0,050	6
6000	3,0	0,I9	0,035	6
8000	5,2	0,I0	0,027	6
I0000	8,I	0,05	0,0I7	6

При определении размера пластической зоны использован метод, предложенный в работе Н.А.Вагина [I2]. Величина пластической зоны определяется из выражения

$$R = r_0\sqrt{\frac{B}{\sigma_s}}, \qquad (2.3)$$

где R – радиус зоны неупругих деформаций вокруг выработки, пройденной в изотропных породах;

$B = 2\sigma \cdot \sin 2\alpha$;

$\sigma_s = \kappa\gamma H(\lambda \sin^2\alpha + \cos^2\alpha)$;

$$R = r_0 \sqrt{\frac{2K\gamma H(\lambda \sin^2\alpha + \cos^2\alpha)\sin 2\alpha}{\sigma_s}}. \qquad (2.4)$$

Для определения величины напряжений σ и размера пластической зоны R построены номограммы (рис. 2, 3). Подставив исходные значения величин, входящих в выражение (I.25), получим величину смещения пород в кверщлаге в любой момент времени.

Пример. Допустим, следует определить интенсивность смещения контура капитальной выработки, пройденной по слабым вмещающим породам.

В Донецком бассейне, в шахте "А", начата отработка нового горизонта на глубине I000 м. Квершлаг, который вскрывает новый горизонт, пройден по различным породам. На участках, где квершлаг пересекают глинистые сланцы, наблюдается пучение пород. Угол падения пласта составляет 40^0, площадь сечения квершлага - II,I $м^2$, радиус выработки - 2,5 м. Квершлаг крепится металлической арочной крепью сопротивлением, равным 20 $тс/м^2$. Величина предела прочности на сжатие глинистого сланца в образце $\sigma_{сж}^{обр} = 2000$ $тс/м^2$.

Определяем численное значение всех величин, входящих в исходное уравнение (I.24). Величина предела текучести пород $\sigma_s^м$ находится по формуле (2.I):

$$\sigma_s^м = 0{,}25\,\sigma_{сж}^м = 0{,}25 \cdot 2000 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}7 = 250\ тс/м^2.$$

Используя выражение (2.3), определяем размер пластической зоны:

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}2 \cdot 2{,}5 \cdot 1000(0{,}9\sin^2 40^0 + \cos^2 40^0)\sin 80^0}{250}};$$

$$R = 10\ м.$$

Зависимость коэффициента вязкости от времени для пород, предел прочности которых $\sigma_{сж}^м = $ I000 $тс/м^2$, выражается уравнением

$$\eta(t) = 0{,}8 \cdot 10^5 + \frac{10^5 t}{0{,}8 + 0{,}2t}.$$

Подставив исходные данные в уравнение (I.25), получим величину смещения пород кровли и почвы в квершлаге:

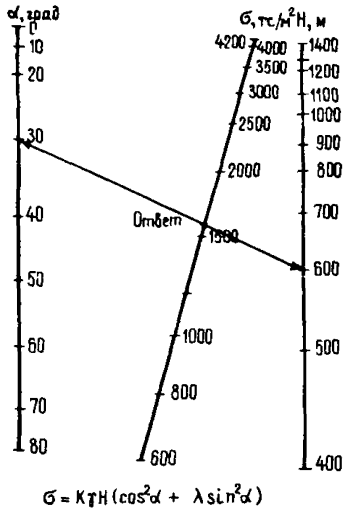

Рис. 2. Номограмма для определения напряжения в массиве горных пород

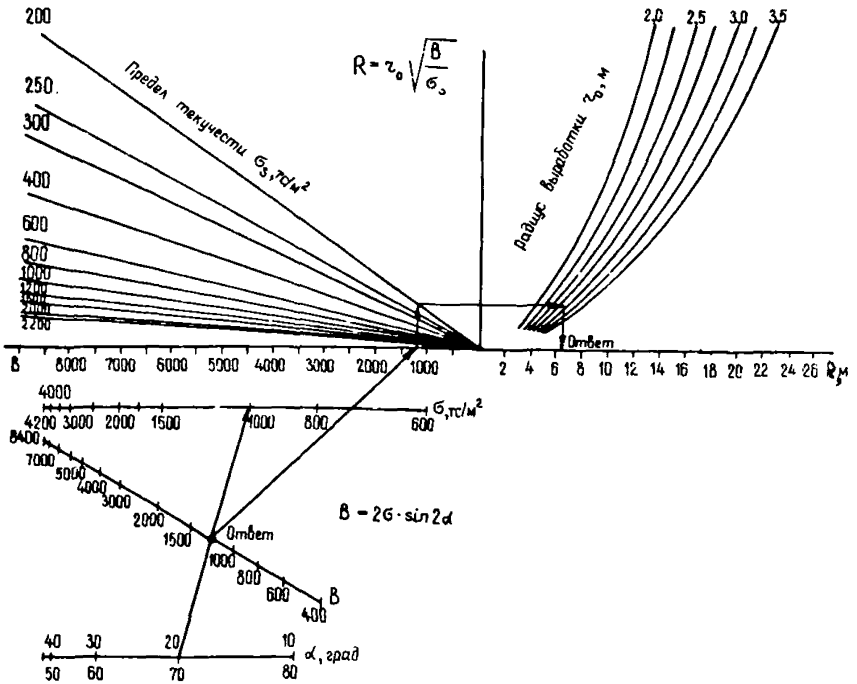

Рис. 3. Номограмма для определения размера пластической зоны

$$W=\int_0^t \frac{4\left[1{,}2\cdot 2{,}5\cdot 1000\left(0{,}9\sin^2 40^\circ+\cos^2 40^\circ\right)-2500\ln\frac{10}{2{,}5}-20\right]\cdot 2{,}5\cdot 10^2}{3\left(2{,}5^2+10^2\right)\left[0{,}8\cdot 10^5+\frac{10^5 t}{0{,}8+0{,}2t}\right]}dt.$$

При пользовании расчетной формулой (I.25) следует учитывать, что нагрузка на слой пород в пластической зоне в течение срока службы выработки не остается постоянной, а уменьшается.

Задача установления закономерности изменения нагрузки во времени очень сложна и пока не решена. Наблюдениями, проведенными ВНИМИ и ИГТМ АН УССР [I3, I4] в капитальных выработках глубоких шахт Донбасса, установлено, что величина смещения пород в течение первых трех-четырех месяцев после проходки составляет более 50% общей величины деформации за весь срок эксплуатации. Поэтому при использовании расчетной формулы (I.25) следует определять величину смещения пород за первые три месяца с момента проведения выработки. Для нахождения величины смещения за весь срок службы выработки полученную величину следует удвоить.

В приведенном выше примере определялась величина смещения пород за три месяца; она составила

$$W_1=4760\int_0^{90}\frac{dt}{0{,}8\cdot 10^5+\frac{10^5 t}{0{,}8+0{,}2t}}=\frac{4760}{10^5}\int_0^{90}\frac{dt}{0{,}8+\frac{t}{0{,}8+0{,}2t}}=$$

$$=\frac{4760}{10^5}\int_0^{90}\frac{(0{,}8+0{,}2t)}{0{,}8\cdot 0{,}8+0{,}8\ 0{,}2t+t}dt=$$

$$=0{,}047\int_0^{90}\frac{0{,}8+0{,}2t}{t(1+0{,}16)+0{,}64}dt.$$

Для решения данного уравнения используем табличный интеграл вида

$$\int\frac{\beta x+\alpha}{fx+q}dx,$$

где $\alpha=0{,}8;$

$\beta=0{,}2;$

$$f = 1 + \eta_0 \cdot \beta = 1{,}16;$$

$$q = \eta_0 \cdot a = 0{,}64; \quad x = t.$$

Решение этого интегрального выражения представляет собой зависимость

$$\int \frac{ax+b}{fx+q}\,dx = \frac{bx}{f} + \frac{bf - bq}{f^2} \ln (fx + q).$$

Применительно к нашему уравнению интеграл будет иметь значение

$$\int_0^{90} \frac{dt}{\eta(t)} = \frac{\beta t}{1+\eta_0 \beta} + \frac{\beta(1+\eta_0\beta) - \beta\eta_0 a}{(1+\eta_0\beta)^2} \times$$

$$\times \ln \left[(1+\eta_0\beta)\cdot t + \eta_0 \cdot a\right] = \frac{0{,}2 \cdot 90}{1{,}16} + \frac{0{,}2 \cdot 1{,}16 - 0{,}2 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8}{1{,}16^2} \times$$

$$\times \ln (1{,}16\,t + 0{,}64) \simeq 20.$$

После интегрирования получим, что величина смещения W_1 при t = 90 сут составляет I м, а величина смещения пород за весь срок службы квершлага W_2 составит $2W_1$ = 2 м.

Для оценки степени надежности предложенного метода расчета напряженно-деформированного состояния массива в зоне расположения капитальных выработок было произведено сопоставление расчетных величин пучения пород, полученных предложенным методом, с результатами замеров величин смещений пород в капитальных выработках глубоких шахт ("Красная Звезда", "Пролетарская-Глубокая", I-5 "Кочегарка" и другие), проведенных ВНИМИ, ИГТМ АН УССР и ИГД им. А.А.Скочинского [I3, I4]. Результаты сопоставления приведены в табл. 2.

Как следует из таблицы, отклонение расчетных величин от фактических составляет I0-20%. Это позволяет применять предложенный метод для определения величины деформации пород в квершлагах, пройденных по породам, склонным к пучению, в любой момент времени.

Использование метода дает возможность научно обоснованно подойти к вопросам выбора оптимальных типов крепей, которые обеспечат удовлетворительное состояние выработок в течение всего срока их службы.

Таблица 2

Шахта	Глубина горизонта H, м	Угол падения пласта, град	Предел прочности вмещающих пород $\sigma_{сж}^{обр}$, кгс/см^2	Величина натурного смещения (по шахтным наблюдениям), мм	Расчетная величина смещения, мм	Отклонение расчетной величины смещения от натурной, %
"Красная Звезда"	I200	60	240 450	I20 30	I29 34	+7,5 +I3,3
Им. Ильича	540 700	35 35	345 270	I7 54	I5 52	-I2,0 -4,0
I-5 "Кочегарка"	970	60	380	30	33	+I0,0
Им. Бажанова	I0I2	I2	300 420	I52 94	I45 I0I	-4,0 +7,4
"Красноармейская-Капитальная"	986	8	350 530	402 278	4I8 257	+I0,0 -I0,0

ЛИТЕРАТУРА

I. Основные положения по разработке проектов новых и реконструкции действующих угольных шахт Донецкого бассейна на глубоких горизонтах.М., Минуглепром СССР, 1971.

2. Глушко В.Т., Ваганов И.И., Кравцов И.С. Исследование физико-механических свойств горных пород и проявлений горного давления в подготовительных выработках глубоких шахт Донбасса. Киев, "Наукова думка", 1969.

3. Указания по терминологии горного давления. Л., ВНИМИ, 1972.

4. Сборник принципиальных схем вскрытия и подготовки шахтных полей, систем разработки и схем вентиляции, рекомендуемых для применения при проектировании угольных шахт. Пласты тонкие и средней мощности. Часть I. М., Центрогипрошахт, 1971.

5. Барановский В.И., Весков М.И., Графова А.Я. и др. Метод прогнозирования устойчивости капитальных и подготовительных выработок и вмещающих пород. М., ИГД им.А.А.Скочинского, 1970.

6. Феннер Р. Исследование горного давления. – В сборнике переводов "Горное давление". М., Госгортехиздат, 1961.

7. Савин Г.Н. Влияние крепления на распределение напряжений возле узких подземных выработок. – "Записки Института горной механики АН УССР", 1947, № 5.

8. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М., Углетехиздат, 1954.

9. Либерман Ю.М. Давление на крепь капитальных выработок. М., "Недра", 1969.

10. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. Алма-Ата, "Наука", 1964.

11. Глушко В.Т. Проявления горного давления в глубоких шахтах. Киев, "Наукова думка", 1969.

12. Вагин Н.А. Аналитический метод определения зоны неупругих деформаций вокруг горизонтальных выработок. – "Труды института Унипромедь", вып. XУ. Свердловск, 1972.

13. Басинский Ю.М., Иванов Е.А. Зависимость проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Центрального района Донбасса от основных геологических и горнотехнических факторов. – В сб. "Горное давление и горные удары", вып. 85. Л., ВНИМИ, 1972.

14. Глушко В.Т., Ваганов И.И., Стрельцов Е.В. и др. К вопросу выбора типа крепи капитальных выработок глубоких шахт Центрального района Донбасса. – В сб. "Вопросы теоретической и экспериментальной реологии горных пород", вып.2. Киев, "Наукова думка", 1973.

Докт.техн.наук В.И.Барановский,
докт.техн.наук М.И.Весков,
канд.техн.наук А.Я.Графова, инж. С.Н.Выборкова

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СМЕЩЕНИЯ КОНТУРА КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

Редактор А.Ф.Кустова

Т-06323 Тираж 600 Изд. № 7496 Цена 12 коп. Заказ № 633

Типография Института горного дела им. А.А.Скочинского
1,5 уч.-изд.л. Подписано к печати 18/III 1975 г.

gost.e-ecolog.ru