

Ордена Октябрьской
Революции и
ордена Трудового
Красного Знамени

**ИНСТИТУТ
ГОРНОГО
ДЕЛА**

ИМЕНИ

А. А. СКОЧНИНСКОГО



**МЕТОДИКА
РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИЯ
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ КРОВЛЕЙ**



МОСКВА

1980

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

Лаборатория
горного давления

УТВЕРЖДЕНА
заместителем директора
института
проф. докт техн. наук
А. С. КУЗЬМИЧОМ
5 марта 1980 г.

МЕТОДИКА
РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ КРОВЛЕЙ



Москва
1980

Приведены методика определения напряжения и деформации в угольном пласте, залегающем под любым углом, при разработке его с закладкой выработанного пространства или с полным обрушением, а также закономерности изменения напряженно-деформированного состояния в пласте в зависимости от коэффициента бокового распора, компрессионных характеристик закладочных материалов и обрушенных пород, глубины разработки и наличия неоднородностей в угольном пласте.

Методика предназначена для работников научно-исследовательских и проектных организаций, занимающихся проектированием систем разработки.



В В Е Д Е Н И Е

С переходом горных работ на более глубокие горизонты резко возрастает горное давление и увеличивается возможность возникновения внезапных выбросов угля и газа, поэтому важное значение приобретает задача изучения напряженно-деформированного состояния краевой части угольного массива, особенно при выемке выбросоопасных пластов.

Основными параметрами, от которых зависит напряженно-деформированное состояние разрабатываемого угольного пласта, являются глубина разработки, коэффициент бокового распора нетронутого массива, способ управления кровлей, компрессионные характеристики закладочных материалов и структурные свойства угольного пласта. Учесть наиболее полно все эти параметры и вывести закономерности изменения горного давления возможно лишь при применении аналитических методов расчета, поэтому возникла необходимость создания методики расчета напряженно-деформированного состояния угольного пласта с учетом всех перечисленных параметров.

СВОЙСТВА И СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНОГО ПЛАСТА И ЗАКЛАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Угольный пласт и вмещающие его горные породы находятся в напряженно-деформированном состоянии, вызванном весом вышележащих пород.

При определении напряженного состояния угольного пласта необходимо ввести две системы координат (рис. 1): одну, ориентированную по гравитационным силам, и другую, ориентированную по залеганию пласта.

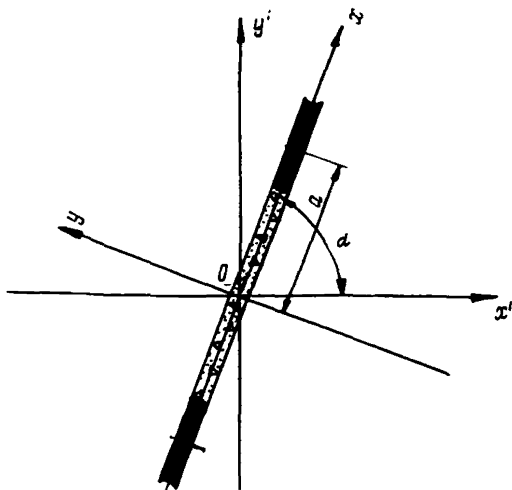


Рис. 1. Схема расположения очистной выработки

Напряженное состояние нетронутого массива относительно первой из них $x'y'$ определяется компонентами напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_{y'}^0 &= \sigma (H - y') ; \\ \sigma_{x'}^0 &= \beta \sigma (H - y') ; \\ \tau_{x'y'}^0 &= 0 , \end{aligned} \quad (I)$$

где H — глубина залегания пласта в центре очистной выработки;
 β — коэффициент бокового распора.

Компоненты напряжений σ_y^0 , σ_x^0 и τ_{xy}^0 относительно наклонной системы координат xy определяются из выражений

$$\begin{aligned} \sigma_y^0 &= \rho \sigma (H - x \sin \alpha - y \cos \alpha) ; \\ \sigma_x^0 &= q \sigma (H - x \sin \alpha - y \cos \alpha) ; \\ \tau_{xy}^0 &= t \sigma (H - x \sin \alpha - y \cos \alpha) , \end{aligned} \quad (2)$$

где α — угол падения пласта;

$$\rho = \frac{1+\beta}{2} + \frac{1-\beta}{2} \cos 2\alpha ;$$

$$q = \frac{1+\beta}{2} + \frac{1-\beta}{2} \cos 2\alpha; \quad (3)$$

$$t = \frac{1-\beta}{2} \sin 2\alpha.$$

Таким образом, основными характеристиками, влияющими на напряженное состояние нетронутого горного массива, являются вес вышележащих пород и коэффициент бокового распора.

Величина коэффициента бокового распора зависит от горно-геологических условий и наличия тектонических нарушений. Ввиду малого количества экспериментальных данных о величине коэффициента бокового распора его иногда определяют через коэффициент Пуассона ν [1] по формуле

$$\beta = \frac{\nu}{1-\nu}. \quad (4)$$

Основываясь на данных натуральных измерений, некоторые исследователи [2, 3, 4] считают, что в основном можно ограничиться применением двух значений коэффициента бокового распора: для прочных хрупких пород принимать его равным 0,5, а для глинистых, особенно обводненных и слабых, — равным единице.

Особое место занимают районы, подверженные действию тектонических сил. Коэффициент бокового распора для этих условий может быть больше единицы, а вертикальная составляющая может отличаться от величины γH [5].

Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется экспериментальному определению в натуральных условиях коэффициентов бокового распора. Проведение таких работ связано со значительными трудностями, поэтому их мало и не составлена карта полей напряжений нетронутого массива для всех месторождений.

Большие работы в этом направлении проведены для условий Кузнецкого бассейна, который характеризуется крупными тектоническими нарушениями. Основные тектонические структуры бассейна представляют складки, ориентированные вдоль длинной оси синклиналя с юго-востока на северо-запад и осложненные крупными разрывными нарушениями.

Тщательные исследования напряженного состояния нетронутого массива проведены для Араличевского и Прокопьевско-Киселевского районов Кузбасса [5], опасных по внезапным выбросам. Величины компонент напряжений нетронутого массива определялись методом разгрузки вне зоны влияния очистных работ.

В результате проведенных экспериментов установлено, что для условий Аралычевского района (шахта им.Орджоникидзе) горизонтальная составляющая нормальных напряжений нетронутого массива больше вертикальной в 2-3 раза, т.е. $\beta = 2 \div 3$. Для условий Прокопьевско-Киселевского района (шахты "Ноградская" и "Коксовая") получено, что вертикальная составляющая больше горизонтальной в среднем в 2 раза, т.е. $\beta = 0,5$. Следовательно, различные районы Кузбасса характеризуются разной величиной коэффициента бокового распора. Поэтому для таких районов необходимо знать конкретные значения коэффициентов бокового распора.

В некотором приближении можно принять, что слоистый горный массив со сцеплением по контактам слоев до начала расслоения является квазиоднородным, причем слои предполагаются тонкими и с одинаковыми или близкими модулями упругости.

Горный массив принимается также квазиизотропным, т.е. отношение модулей упругости, измеренных вдоль и поперек напластования, близко к единице. Существует большое количество экспериментов, подтверждающих это положение [6, 7].

Так как большинство горных пород обладает свойствами ползучести, трещиноватости, то массив принимается не упругим, а линейно-деформируемым. Это означает, что связь между напряжениями и деформациями принимается линейной, но вместо кубикового модуля упругости берется величина модуля деформации всего массива с учетом трещиноватости, слоистости и ползучести пород. При длительной ползучести деформация пород возрастает, а следовательно, модуль деформации уменьшается.

Из экспериментальных кривых ползучести можно получить зависимость модуля деформации массива от времени в виде

$$E(t) = E_0 + (E_\infty - E_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right), \quad (5)$$

где E_0 - модуль деформации в массиве в начальный момент времени при $t = 0$;

E_∞ - модуль деформации массива при $t = \infty$, т.е. в установившемся состоянии;

t_0 - параметр скорости изменения модуля деформации.

Анализируя данные работы А.С.Эржанова [8], можно заключить, что отношение $E_0 : E_\infty$ для песчаника приблизительно равно 1,5-2,0, для алевролита - 3,0 для аргиллита - 3,7, т.е. колеблется в диапазоне 1,5-3,7.

Трещиноватость и различные ослабления тоже снижают модуль деформации массива, не меняя линейного характера его деформирования. Это положение достаточно хорошо подтверждено экспериментальными замерами мгновенного модуля деформации в массиве с помощью прессномера [9]. Эти замеры показали, что коэффициент уменьшения модуля равен 2,5–3,5. Для интерпретации этих явлений К.В.Руппенейтом и И.В.Тарасовой предложена механическая модель трещиноватого массива [10]. Согласно этой модели, трещиноватость и различные ослабления в массиве снижают пропорционально их размерам модуль деформации массива, а общий характер деформирования массива в модели остается линейным.

Так как уравнения теории упругости для определения напряженно-деформированного состояния тела основаны только на предположении о линейной связи между напряжениями и деформациями независимо от величины параметров, то к массиву можно применить методы теории упругости, а модуль упругости массива $E_{упр}$ в расчетах можно заменить модулем деформации массива E , уменьшенным за счет ползучести, трещиноватости и слоистости пород:

$$E = E_{упр} / K. \quad (6)$$

Общий коэффициент уменьшения модуля упругости K , согласно вышеприведенным данным, можно взять как произведение крайних значений коэффициентов 4–13 в зависимости от свойств пород. Для приближенных расчетов общий коэффициент обычно принимается равным 10.

При разработке угольных пластов с закладкой выработанного пространства необходимо изучить свойства и состояние углей и закладочных материалов. Обычно закладочные материалы обладают нелинейной характеристикой уплотнения [11], а для углей характерны как линейные, так и нелинейные деформации.

Поэтому при учете свойств угольного пласта и закладки в решении задачи о напряженно-деформированном состоянии краевой части угольного пласта вводятся аналитические зависимости, характеризующие деформационные свойства этих материалов. Нами предложены несколько типов аналитических зависимостей $\varepsilon = f(\sigma)$ между напряжением σ и деформацией ε при одноосном сжатии:

I тип

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{\sigma_0}} \right) = \varepsilon_1(\sigma); \quad (7)$$

II тип

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_0 - \sigma} = \varepsilon_2(\sigma); \quad (8)$$

III тип

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m = \varepsilon_3(\sigma), \quad (9)$$

где ε - относительная деформация;

σ - напряжение;

$\varepsilon_0, \sigma_0, m$ - характеристики материала.

Зависимость I типа (рис. 2) характерна для материалов, нелинейно уплотняющихся. Параметр ε_0 представляет собой максимальную усадку, а σ_0 характеризует крутизну компрессионной кривой. Эта зависимость особенно хорошо отражает свойства закладочных материалов.

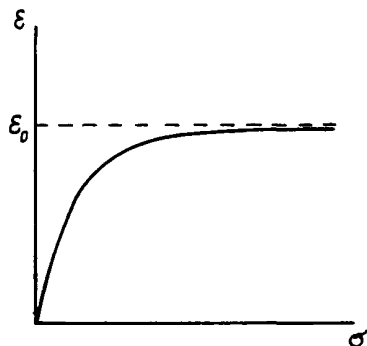


Рис. 2. График зависимости деформации от напряжения для материалов I типа

Зависимость II типа (рис. 3) наиболее характерна для углей, обнаруживающих при одноосном сжатии псевдопластические деформации. Параметр σ_0 приблизительно равен пределу пластичности, а ε_0 характеризует крутизну кривой.

Зависимость III типа (рис. 4) является наиболее гибкой, позволяя аппроксимировать свойства как уплотняющихся ($m < 1$), так и псевдопластических ($m > 1$) материалов. Кроме того, этой зависимостью можно характеризовать упругие материалы при $m = 1$ с модулем упругости $E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$.

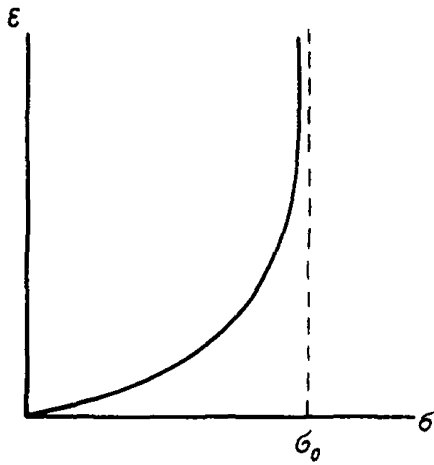


Рис. 3. График зависимости деформации от напряжения для материалов II типа

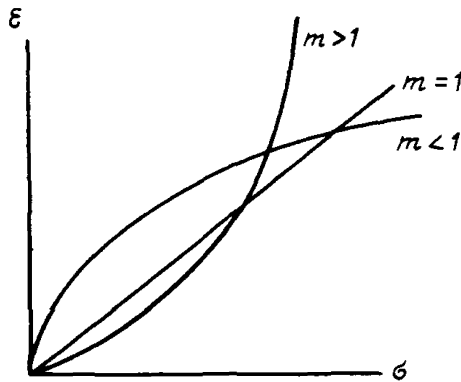


Рис. 4. График зависимости деформации от напряжения для материалов III типа

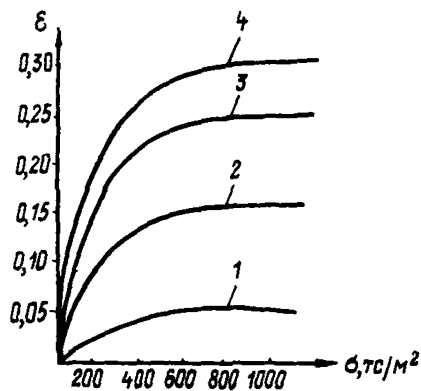


Рис. 5. Компрессионные кривые реальных закладочных материалов с различными характеристиками:

1 - пески реки Обь ($\epsilon_0 = 0,051$; $\sigma_0 = 345$ тс/м²);
 2 - Кузбасские породы с Голубезского карьера ($\epsilon_0 = 0,155$; $\sigma_0 = 244$ тс/м²); 3 - породы вскрыши угольных карьеров Прокопьевско-Киселевского района ($\epsilon_0 = 0,25$; $\sigma_0 = 200$ тс/м²); 4 - породы Кузнецкой свиты ($\epsilon_0 = 0,31$; $\sigma_0 = 180$ тс/м²)

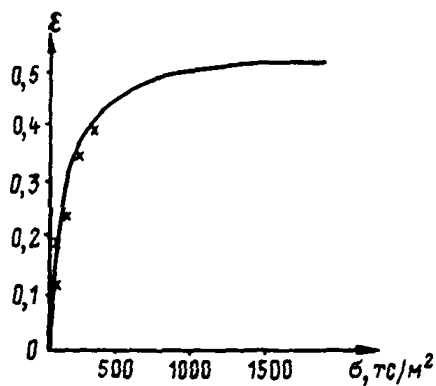


Рис. 6. Компрессионная кривая обрушенных пород

Типичные компрессионные кривые закладочных материалов [11], построенные по экспериментальным данным, хорошо аппроксимируются экспонентой вида (7). На рис. 5 представлены семейства компрессионных кривых для закладочных материалов, применяемых в Кузнецком бассейне.

В случае полного обрушения зависимость ε от σ для слоя обрушенных пород принимается, как и для закладки, но величина ε_0 определяется по формуле

$$\varepsilon_0^{\text{обр}} = 1 - \frac{h_1}{h} (K_p \cdot K_y - 1), \quad (10)$$

где K_p — коэффициент разрыхления обрушенных пород;

K_y — максимальный коэффициент уплотнения обрушенных пород под давлением вышележащей толщи;

h — мощность пласта;

h_1 — мощность непосредственной кровли.

Крутизну компрессионной кривой обрушенных пород можно принять по аналогии с крутизной компрессионных кривых бутовых полос, натурные данные о которых представлены на рис. 6 крестиками [12]. Построенная здесь по уравнению (5) кривая соответствует $\varepsilon_0 = 0,5$ и $\sigma_0 = 200 \text{ тс/м}^2$.

Применительно к обрушенным породам в расчете приняты некоторые типичные значения: $h_1/h = 6$; $K_p = 1,2$; $K_y = 0,9$, подставив которые в формулу (10) получим $\varepsilon_0^{\text{обр}} = 0,5$.

МЕТОД И СХЕМА РАСЧЕТА

Рассматривается одиночный угольный пласт под любым углом падения. Разработка пласта осуществляется с закладкой выработанного пространства или с полным обрушением.

Для определения напряженно-деформированного состояния краевой части угольного пласта решается плоская задача теории упругости на основе метода Мусхелишвили [13]. Плоскость сечения разработки проводится вкострест простирания пласта или по простиранию при выполнении условий плоской деформации.

Задача заключается в том, чтобы найти нормальные напряжения и вертикальные смещения в угольном пласте.

В основу метода решения задачи положен принцип совместности перемещения кровли — почвы, с одной стороны, и закладки или угля, с другой, состоящий в том, что конвергенция кровли — почвы

должна быть равна обжатию закладки или угля на соответствующих участках.

Уравнение, выражающее этот принцип, имеет вид

$$\psi_{гн}(x) - \psi_{\sigma}(x) = \delta_{\sigma}(x) - \delta_{гн}(x), \quad (II)$$

где $\psi_{гн}(x)$ — конвергенция кровли — почвы от действия только объемного веса пород;

$\psi_{\sigma}(x)$ — расхождение кровли — почвы под действием реакции закладки или угля;

$\delta_{\sigma}(x)$ — обжатие закладки или угля под действием искомого напряжения $\sigma(x)$;

$\delta_{гн}(x)$ — первоначальное обжатие угля под действием веса пород;

(член за двойной чертой учитывается только для угля).

Уравнение (II) справедливо для всей линии пласта $-\infty < x < \infty$. Однако для упрощения окончательных результатов и возможности применения численных методов на линии пласта выбирается участок $-a \leq x \leq a$ с таким расчетом, чтобы его концы находились в массиве угля, там, где возмущение, вызванное выработкой, практически затухает. Все дальнейшие соотношения получены именно для такого рабочего участка.

Решение уравнения (II) включает в себя решение нескольких задач; в результате полного решения будут определены нормальные по отношению к пласту напряжения $\sigma(x)$ и смещения $\psi(x)$.

Величину смещений $\psi_{гн}(x)$ определяем, исходя из формул теории упругости [13]:

$$\frac{E}{1+\nu}(\mu + i\nu) = (3-4\nu) \varphi(z) - \varphi(\bar{z}) - (z-\bar{z})\overline{\phi(z)}, \quad (I2)$$

где $z = x + iy$; $\bar{z} = x - iy$;

ν — смещение по направлению оси y ;

μ — смещение по направлению оси x ;

E — модуль деформации массива;

ν — коэффициент Пуассона массива.

Функция $\varphi(z)$ определяется из соотношения

$$\varphi(z) = \int \phi(z) dz, \quad (I3)$$

где $\phi(z)$ — функция напряжений.

Выражение для этой функции получено нами ранее [14] в виде

$$\Phi(z) = \frac{\delta H}{2} (\rho - it) \left[\left(\frac{z}{\sqrt{z^2 - a^2}} - 1 \right) \left(1 - z \frac{\sin \alpha}{H} \right) + \frac{a^2 \sin \alpha}{2H \sqrt{z^2 - a^2}} \right]. \quad (14)$$

Вычисляя интеграл (13), получаем

$$\varphi(z) = \frac{\delta H}{2} (\rho - it) (\sqrt{z^2 - a^2} - z) \left(1 - \frac{z}{2H} \sin \alpha \right). \quad (15)$$

Конвергенцию $v_{\mathcal{H}}(x)$ по линии угольного пласта, т.е. при $y = 0$, и, следовательно, при $z = \bar{z}$, можно определить по формуле (12). В результате подстановки формулы (15) получим в пределах $|x| \leq a$

$$v_{\mathcal{H}}(x) = \frac{4(1 - \nu^2) \rho \delta H}{E} \left(1 - \frac{x}{2H} \sin \alpha \right) \sqrt{a^2 - x^2}, \quad (16)$$

причем ρ в этом уравнении определяется по формуле (3).

Для определения вида второго члена левой части уравнения (II), т.е. $v_{\sigma}(x)$, решается задача о смещениях при условии, что к площадкам кровли и почвы шелевидной выработки приложено искоемое нормальное давление $\sigma(x)$. Сначала считаем, что оно приложено на бесконечно малой длине $d\xi$ с координатой середины площадки $x = \xi$. Расхождение кровли - почвы $d\varphi$ будет тогда пропорционально величине $\sigma(\xi) d\xi$ и будет зависеть как от положения ξ площадки, к которой приложено давление, так и от положения x точки, в которой определяется расхождение. Следовательно, оно запишется в виде

$$d\varphi = K(x, \xi) \sigma(\xi) d\xi, \quad (17)$$

где $K(x, \xi)$ - некоторая функция влияния, подлежащая вычислению.

Если теперь считать, что к кровле и почве на всем участке $-a \leq x \leq +a$ приложено распределенное давление $\sigma(x)$, то на основе принципа суперпозиции и теоремы о среднем можно записать

$$v_{\sigma}(x) = \int_{-a}^{+a} K(x, \xi) \sigma(\xi) d\xi \approx$$

$$\begin{aligned}
 & \approx \sum_{k=1}^n \sigma_k \int_{\xi_k}^{\xi_{k+1}} K(x, \xi) d\xi = \\
 & = \sum_{k=1}^n \sigma_k D_k(x).
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Здесь n - количество равных интервалов разбиения участка;
 $\xi_k; \xi_{k+1}$ - координаты соответственно левого и правого концов k -го интервала;
 σ_k - среднее значение искомого давления на k -м интервале. Эта расчетная схема изображена на рис. 7.

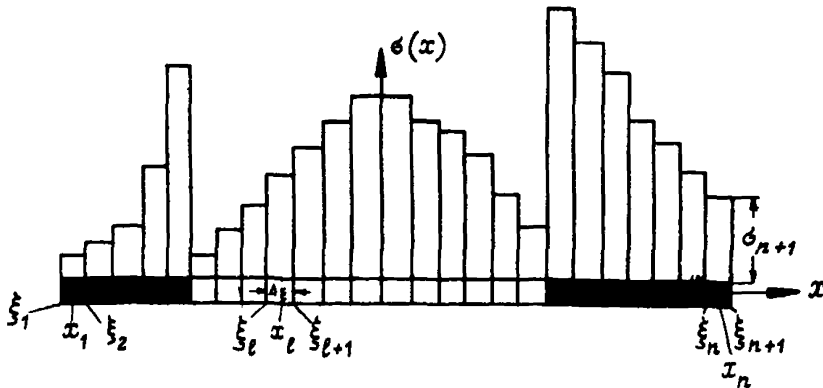


Рис. 7. Расчетная схема к определению давлений на уголь и закладку

Интеграл $D_k(x)$, представляющий собой эпюру расхождения краев щели под действием единичного давления, приложенного к верхнему и нижнему краям на участке $\xi_k \leq x \leq \xi_{k+1}$, получен нами [14] в виде

$$\begin{aligned}
 D_k(x) = & \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} \left[2 \left(a \gamma \cos \frac{\xi_k}{a} - a \gamma \cos \frac{\xi_{k+1}}{a} \right) \sqrt{a^2 - x^2} + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{\xi_k}{a} - x \right) \ln \frac{a^2 - \xi_k x - \sqrt{(a^2 - \xi_k^2)(a^2 - x^2)}}{a^2 - \xi_k x + \sqrt{(a^2 - \xi_k^2)(a^2 - x^2)}} - \right.
 \end{aligned}$$

$$- \left(\sum_{k+1}^{-x} \right) \ln \frac{a^2 - \sum_{k+1} x - \sqrt{(a^2 - \sum_{k+1}^2) (a^2 - x^2)}}{a^2 - \sum_{k+1} x + \sqrt{(a^2 - \sum_{k+1}^2) (a^2 - x^2)}}. \quad (19)$$

Для вычисления обжатия закладки и угла, т.е. правых частей уравнения (II), применим обобщенную гипотезу Винклера [14], согласно которой обжатие зависит только от давления, действующего в той же точке. Математически это выражается в виде

$$\delta_{\sigma} (x) = \varepsilon_i (\sigma) \cdot h; \quad (i=1, 2, 3), \quad (20)$$

где $\varepsilon_i (\sigma)$ - деформация, уравнение которой выводится для закладки и угла из выражений (7)-(9);

h - мощность пласта.

Второй член правой части уравнения (II) $\delta_{\gamma H} (x)$, выражающий первоначальное обжатие угла от действия веса вышележащих пород, запишется в виде

$$\delta_{\gamma H} (x) = \varepsilon_l \left[\rho \gamma H \left(1 - \frac{x}{H} \sin d \right) \right] \cdot h, \quad (21)$$

где ε_l - деформация угла, уравнение которой выводится для угла из выражений (7)-(9); l - номер, соответствующий уравнению, - причем вместо σ туда подставляется $\rho \gamma H \left(1 - \frac{x}{H} \sin d \right)$.

Таким образом, получив все члены уравнения (II), запишем

$$\begin{aligned} & \frac{4(1-\nu^2)}{E} \rho \gamma H \left(1 - \frac{x}{2H} \sin d \right) \sqrt{a^2 - x^2} - \sum_{k=1}^n \Pi_k (x) \sigma_k = \\ & = h \varepsilon_i (\sigma) \parallel - h \varepsilon_l \left[\rho \gamma H \left(1 - \frac{x}{H} \sin d \right) \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

Требуя выполнения уравнения (22) в дискретном множестве точек

$$x_l = \frac{1}{2} \left(\sum_l + \sum_{l+1} \right),$$

получим дискретный аналог этого уравнения в виде системы

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n \Pi_k(x_\ell) \phi_k + h \varepsilon_i(\phi) = \\ & = \frac{4(1-\nu^2) p \gamma H}{E} \left(1 - \frac{x_\ell}{2H} \sin \alpha \right) \sqrt{a^2 - x^2} \Bigg\| + \\ & + h \varepsilon_i \left[p \gamma H \left(1 - \frac{x_\ell}{H} \sin \alpha \right) \right] . \\ & (\ell = 1, 2, \dots, n). \end{aligned} \quad (23)$$

Уравнение (23) в развернутом виде представляет собой систему из n уравнений с n неизвестными. В левой части этой системы ϕ входит как линейно, так и нелинейно - через члены с $\varepsilon_i(\phi)$. Поэтому решение данной системы уравнений следует производить методом Ньютона-Рафсона [15]. На $(m+1)$ -м шаге итерационного процесса этого метода решается линейная алгебраическая система уравнений относительно неизвестных $\Delta \phi_k^{(m+1)}$:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n \left[\Pi_k(x_\ell) + h \varepsilon_i'(\phi) \delta_{k\ell} \right] \Delta \phi_k^{(m+1)} = \\ & = \psi_{\gamma H}(x_\ell) - h \varepsilon_i(\phi) - \sum_{k=1}^n \Pi_k(x_\ell) \phi_k^{(m)} \Bigg\| + \\ & + h \varepsilon_i \left[p \gamma H \left(1 - \frac{x_\ell}{H} \sin \alpha \right) \right] \\ & (\ell = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (24)$$

где
$$\delta_{k\ell} = \begin{cases} 1 & \text{при } k = \ell \\ 0 & \text{при } k \neq \ell \end{cases}$$

Решение этой системы уравнений проведено нами на ЭВМ для различных значений параметров, входящих в эти уравнения.

В результате вычислений получены нормальные напряжения ϕ_y , направленные перпендикулярно линии угольного пласта, и конвергенция пород кровли и почвы $\psi = \varepsilon h$ на участках угольного пласта и закладки.

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРАЕВОЙ ЧАСТИ
РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ РАЗЛИЧНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ**

Основными параметрами, влияющими на напряженно-деформированное состояние разрабатываемого угольного пласта, являются коэффициент бокового распора, глубина разработки, компрессионные характеристики закладочного массива и его отставание от забоя, свойства угольного пласта и наличие в нем неоднородностей.

Влияние напряженного состояния нетронутого массива

Коэффициент бокового распора β , характеризующий напряженное состояние нетронутого массива, как следует из формул (2), (3) и (22), является параметром, от которого зависит напряженно-деформированное состояние угольного пласта при его разработке.

Для примера рассмотрим крутой угольный пласт мощностью 3 м с углом падения 70° , разрабатываемый на глубине 400 м с закладкой выработанного пространства, компрессионные характеристики которой приняты близкими к аналогичным характеристикам гидрозакладки, а именно: $\xi_0 = 0,15$ и $\sigma_0 = 200 \text{ тс/м}^2$. Модули деформации вмещающих пород и угля взяты соответственно 200000 и 20000 тс/м^2 . Для приведенных условий рассматриваются три случая, отличающихся коэффициентами бокового распора:

$$\beta = 0,5; 1,0 \text{ и } 2,0.$$

На рис. 8 приведены эпюры опорного давления на угольный пласт и кривые, характеризующие полуобжатие угольного пласта. Из представленных графических данных следует, что опорное давление в краевой части угольного пласта наибольшее при $\beta = 2,0$; оно достигает в этом случае 3100 тс/м^2 , в то время как при $\beta = 0,5$ $\sigma_y^{\text{max}} = 1250 \text{ тс/м}^2$, т.е. в 2,5 раза меньше. Обжатие крутого угольного пласта также интенсивнее при больших значениях коэффициента бокового распора. Так, при $\beta = 0,5$ полуобжатие $\psi = 55 \text{ мм}$, а при $\beta = 2,0$ оно увеличивается до 100 мм .

Большое опорное давление при $\beta = 2,0$ формируется под действием начального напряженного состояния нетронутого массива, и оно проявляется при разработке пласта.

Влияние коэффициента бокового распора на величины σ_y и u в угольном пласте при его разработке особенно сказывается на крутых и наклонных пластах. При разработке горизонтальных пластов напряженно-деформированное состояние не зависит от коэффициента бокового распора, что следует из формул (2) и (3) при $\alpha = 0$.

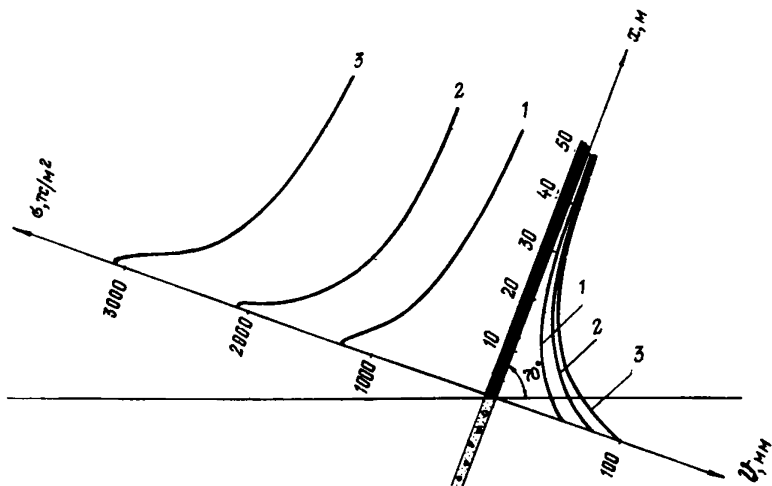


Рис. 8. Эпюры опорного давления σ_y и смещений u в угольном пласте при различных коэффициентах бокового распора β :

1 - 0,5; 2 - 1,0; 3 - 2,0

Таким образом, при разработке крутых угольных пластов, особенно опасных по внезапным выбросам угля и газа, необходимо изучать начальное напряженное состояние нетронутого массива, чтобы знать величину опорного давления в краевой части угольного пласта.

Для вывода различных закономерностей горного давления в краевой части угольного пласта в дальнейшем анализе примем $\beta = 1$, учтя, что при $\beta = 2$ опорное давление увеличивается, а при $\beta = 0,5$ уменьшается по сравнению с $\beta = 1$. Остальные параметры, входящие в расчет, примем следующими: $H = 400$ м; $\alpha = 70^\circ$; $h = 3$ м, $E_{\text{пород}} = 200000$ тс/м², $E_{\text{угл.}} = 20000$ тс/м²; $\nu = 2,5$, $\rho = 100$ м, $\epsilon_0 = 0,15$; $\sigma_0 = 200$ тс/м², $\gamma = 2,5$ тс/м³.

Влияние глубины разработки на напряженно-деформированное состояние краевой части крутого угольного пласта при разработке с закладкой выработанного пространства

Для выявления закономерностей горного давления на разных глубинах разработки рассмотрен крутой угольный пласт, разрабатываемый с закладкой выработанного пространства на глубине 400, 800 и 1200 м.

На рис. 9 приведены эпюры напряжений и полуобжатия краевой части угольного пласта.

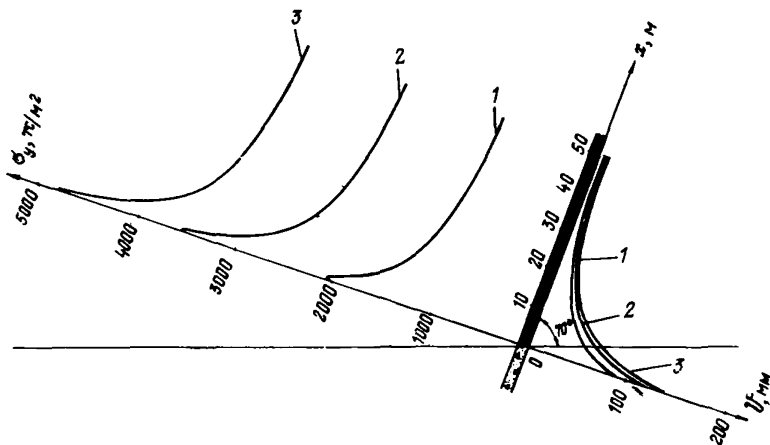


Рис. 9. Эпюры напряжений σ_y и смещений ψ на различных глубинах разработки:

1 - 400; 2 - 800; 3 - 1200 м

В результате анализа этих графиков можно заключить, что с увеличением глубины разработки от 400 до 1200 м опорное давление у кромки угольного пласта возрастает от 2000 до 4800 тс/м^2 , хотя коэффициент концентрации напряжений $\sigma_y/\gamma H$ уменьшается от 2 до 1,6. Обжатие краевой части угольного пласта меняется незначительно от 95 до 135 мм. На большой глубине высокое опорное давление обусловлено в основном напряженным состоянием нетронутого массива; так, при $H = 400$ м $\gamma H = 1000$ тс/м^2 , а при $H = 1200$ м оно увеличивается до 3000 тс/м^2 . Поэтому уголь до разработки, т.е. в нетронутом массиве, находится в условиях высокого давления

и сильного обжатия. Такие проявления горного давления характерны при управлении кровлей закладкой с усадкой в 15%, а при управлении кровлей полным обрушением напряжение σ_y и обжатие угольного пласта значительно возрастают.

Влияние способа управления кровлей
на напряженно-деформированное состояние
краевой части крутого угольного пласта

При разработке угольных пластов с закладкой выработанного пространства необходимо выявить влияние свойств закладочных материалов, а при способе управления полным обрушением – свойств обрушенных пород на напряжения σ_y и смещения ψ в краевой части угольного пласта.

Основным компрессионным параметром, влияющим на напряженно-деформированное состояние угля, является ϵ_0 , т.е. максимальная усадка закладочных материалов или обрушенных пород.

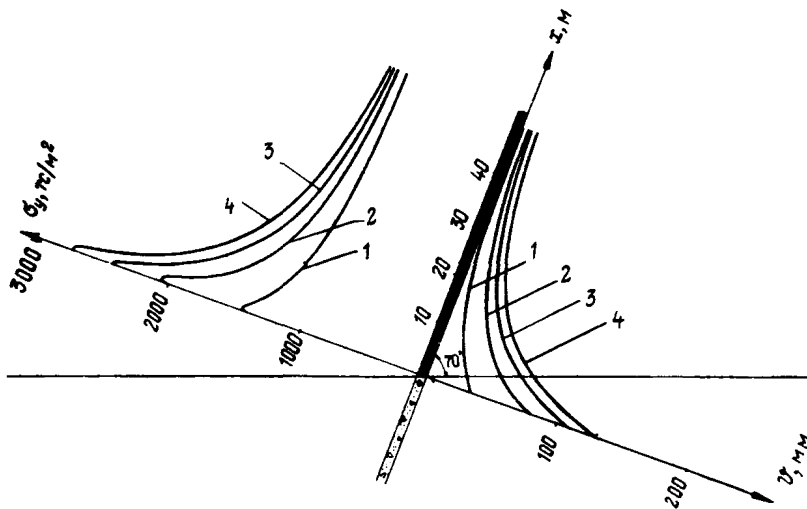


Рис. 10. Эпюры напряжений σ_y и смещений ψ в угольном пласте в зависимости от максимального уплотнения ϵ_0 закладочных материалов и обрушенных пород при $\sigma_0 = 200$ тс/м²:

Для вывода закономерностей влияния компрессионного параметра ε_0 рассмотрим закладочные материалы с усадкой 5; 15; 25% и обрушенные породы с усадкой 50%. На рис. 10 представлены эпюры опорного давления и смещений для этих случаев. Самая большая концентрация напряжений σ_y у кромки угольного пласта будет при способе управления кровлей полным обрушением; она достигнет величины 2,8 γH , в то время как закладка с усадкой в 5% уменьшает опорное давление до 1,4 γH . Аналогичная закономерность наблюдается и для обжатия угольного пласта. Из рисунка следует, что самое интенсивное обжатие угольного пласта происходит в случае управления кровлей полным обрушением. Величина полуобжатия кромки пласта достигает 130 мм, в то время как при закладке с усадкой в 5% эта величина значительно ниже и равна 35 мм.

Из рисунка также следует, что применение закладки с большой усадкой, примерно 25%, тоже дает значительные величины опорного давления $\sigma_y = 2,5\gamma H$ и обжатия кромки угольного пласта $\psi = 115$ мм.

На глубине разработки 1200 м при способе управления кровлей полным обрушением опорное давление у кромки угольного пласта увеличивается до 7200 тс/м², а полуобжатие достигает 230 мм (рис. 11). Даже на столь большой глубине применение закладки резко снижает опорное давление и обжатие кромки угольного пласта. Так, на рис. 11 показаны эпюры σ_y и кривые ψ при применении закладки с усадкой 5% на глубине разработки 1200 м. В этом случае опорное давление у кромки снижается до 3400 тс/м², а полуобжатие до 37 мм. Коэффициент концентрации напряжений у кромки пласта будет составлять 1,13, т.е. будет ниже чем при полном обрушении, где $\sigma_y / \gamma H = 2,4$.

Высокое опорное давление и сильное обжатие кромки угольного пласта потенциально опасны не только сами по себе, но и по газовому фактору, так как вызывают у кромки угольного пласта образование "пробки", препятствующей фильтрации газа к забою. Поэтому закладка выработанного пространства, особенно на больших глубинах, может явиться очень важным фактором борьбы с внезапными выбросами угля и газа.

Анализируя приведенные данные, можно заключить, что для рассмотренных условий благоприятным является применение способа управления кровлей закладкой с усадкой примерно 5%.

Значительное снижение выбросоопасности угольных пластов при управлении кровлей путем закладки выработанного пространства наблюдалось на крутых пластах Э.И.Гайко и Г.Н.Фейтом [16].

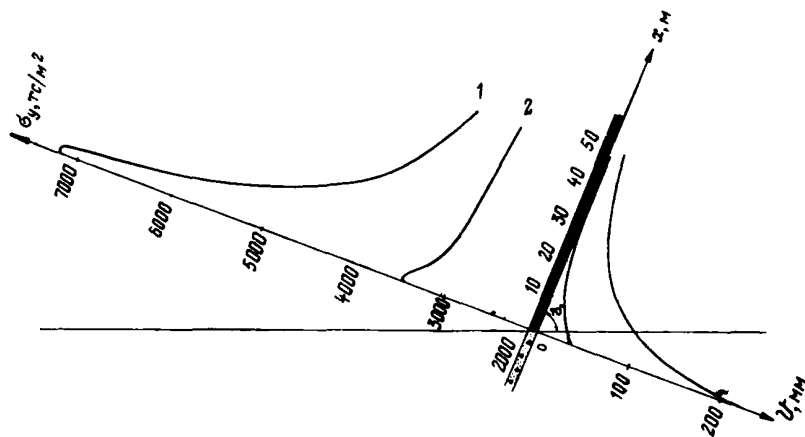


Рис. 11. Эпюры напряжений σ_x и кривые смещений φ в краевой части угольного пласта на глубине разработки 1200 м:

1 - полное обрушение; 2 - закладка с усадкой 5%

Каким бы дорогостоящим и нетехнологичным ни казалось в ряде случаев применение закладки, оно может стать одним из немногих эффективных средств безопасной разработки выбросоопасных пластов.

Влияние неоднородностей в структуре угольного пласта на напряженно-деформированное состояние его краевой части

Представленная выше методика расчета позволяет учесть некоторое количество неоднородностей различных по протяженности пласта размеров и усредненных по мощности пласта. Свойства неоднородностей могут задаваться по любым зависимостям (7)–(9) с различными входящими туда параметрами, так что диапазон свойств может быть большим.

Для примера нами выбраны неоднородности, расположенные в краевой части крутого угольного пласта на различных расстояниях от забоя и обладающие различными модулями упругости.

На рис. 12 представлены эпюры напряжений σ_y и полуобжатий пласта ψ с неоднородностью протяженностью в 1 м в краевой части пласта. Неоднородность слабее, чем угольный пласт, и модуль упругости ее $E = 2000 \text{ тс/м}^2$, т.е. в 10 раз меньше, чем угля. Этот случай как бы имитирует разрушенную зону угля у забоя. Максимум опорного давления отодвигается в глубь угольного пласта на ширину этой неоднородности и по величине почти не меняется по сравнению с однородным углем (1600 тс/м^2).

Теперь рассмотрим случай, когда неоднородность с теми же свойствами, что и в предыдущем случае, расположена на расстоянии 1 м в глубь пласта, а по ширине занимает 0,5 м (рис. 13). В этом случае, как показано на рисунке, в месте расположения слабой неоднородности происходит спад напряжений до 1050 тс/м^2 , а у края пласта подъем σ_y до 1700 тс/м^2 .

Кривые смещений в обоих случаях близки между собой и к кривой смещений однородного угольного пласта.

Рассмотрен также случай, когда угольный пласт у кромки ослаблен ($E = 2000 \text{ тс/м}^2$) на протяжении 1 м, затем имеется геологическое нарушение - пустота (0,5 м), а далее проходит угольный пласт с $E = 20000 \text{ тс/м}^2$ (рис. 14). В этом случае в месте нарушения происходит резкий спад напряжений до нуля, а затем подъем до 1650 тс/м^2 , т.е. большой градиент изменения напряжений, что может оказаться опасным с точки зрения внезапных выбросов угля и газа.

На рис. 15 представлен случай о жесткой неоднородности, расположенной на расстоянии 1 м от забоя, с модулем упругости $E = 200000 \text{ тс/м}^2$, т.е. в 10 раз большим, чем угля. В этом случае в краевой части угольного пласта, в месте расположения жесткой неоднородности, опорное давление резко поднимается до 4000 тс/м^2 и затем так же резко падает. Обжатие пласта, как следует из рисунка, происходит неравномерно с небольшой вогнутостью под неоднородностью.

С увеличением жесткости неоднородности градиент изменения напряжений резко увеличивается, а при наличии в краевой части угольного пласта двух жестких неоднородностей появляются еще большие скачки напряжений σ_y , что очень нежелательно для выско-соопасных угольных пластов (рис. 16).

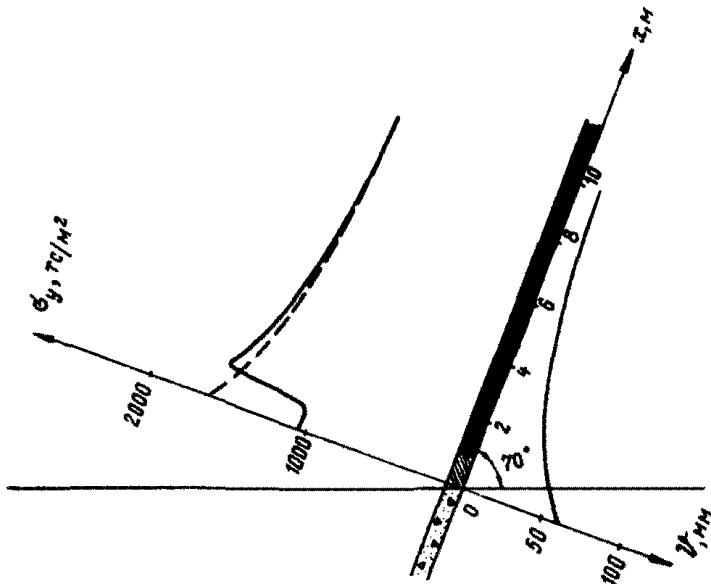


Рис. 12. Эпюры напряжений σ_y и смещений v в угольном пласте при наличии у кромки пласта слабого угля

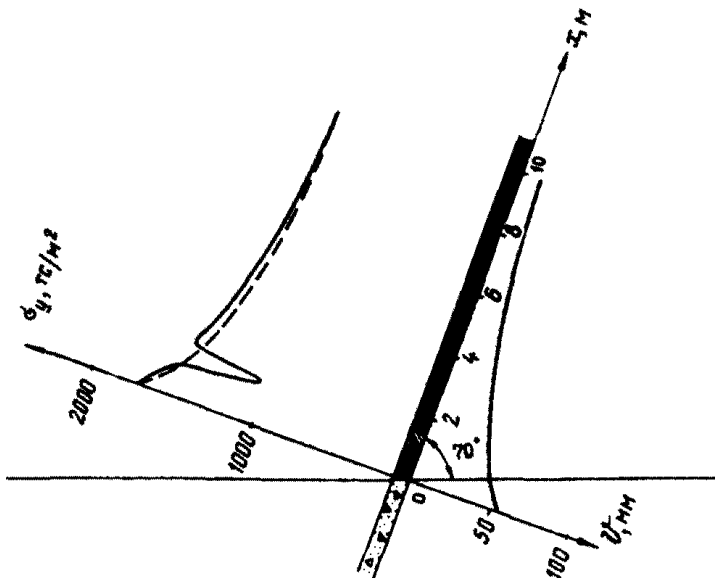


Рис. 13. Эпюры напряжений σ_y и смещений v в угольном пласте при наличии слабой неоднородности на расстоянии 1 м от збоя

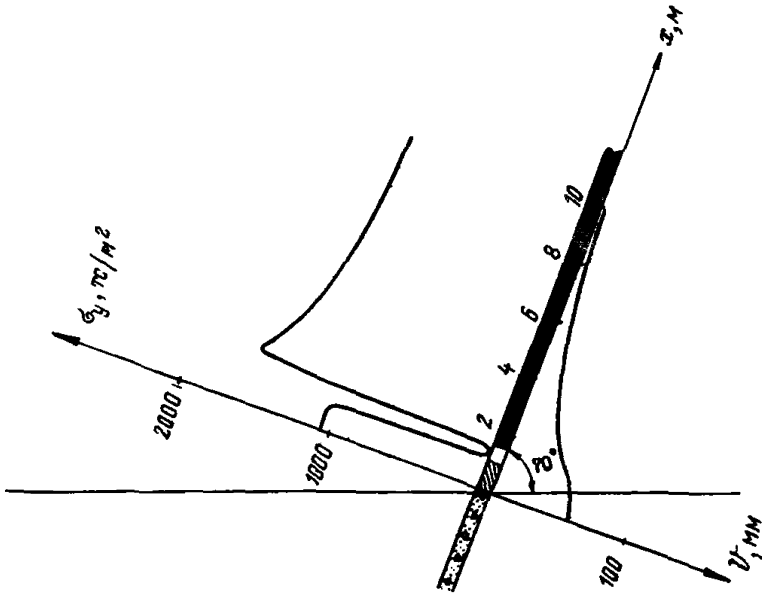


Рис. 14. Эпюры напряжений σ_y и кривая смещений ψ в случае геологического нарушения в краевой части угольного пласта

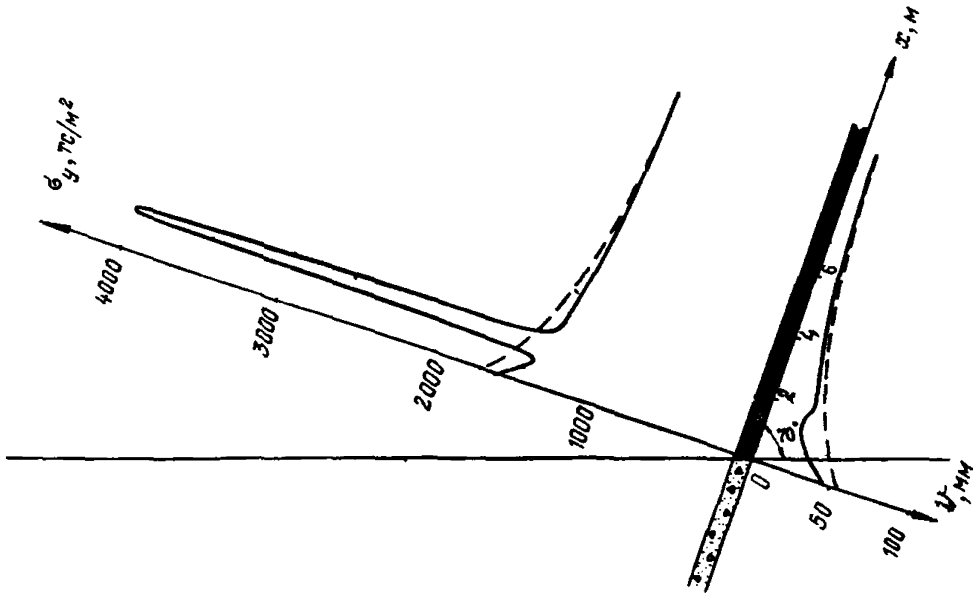


Рис. 15. Эпюры напряжений σ_y и смещений ψ в угольном пласте при наличии в нем жесткого включения:

сплошная линия - пласт с включением, пунктирная - однородный пласт

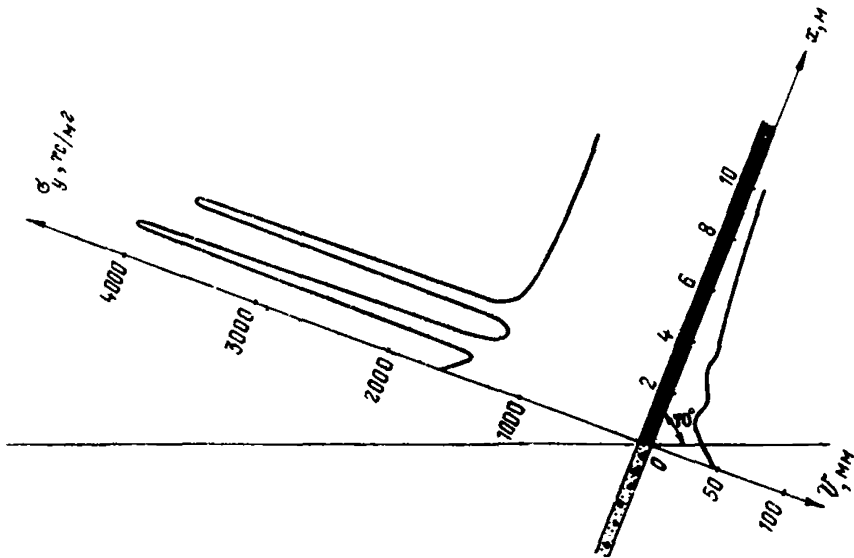


Рис. 16. Эпюры напряжений σ_y и смещений ψ в краевой части угольного пласта с двумя жесткими неоднородностями

Следовательно, появление жестких неоднородностей в угольных пластах, опасных с точки зрения внезапных выбросов угля и газа, требует особых мер предосторожности и разработки способов разгрузки таких пластов.

Влияние отставания закладочного массива от забоя на напряженно-деформированное состояние краевой части угольного пласта

Закладочный массив обычно возводится не непосредственно за забоем, а с некоторым отставанием от него. Влияние этого отставания на напряженно-деформированное состояние краевой части угольного пласта было исследовано нами для нескольких случаев. Рассматривался угольный пласт мощностью 3 м на глубине 400 м при разработке с закладкой выработанного пространства. При применении закладочных материалов с компрессионными характеристиками $\epsilon_0 = 0,15$, $\sigma_0 = 200 \text{ тс/м}^2$ исследовались три случая с отставанием 2,5; 5 и 7,5 м, а также без отставания закладочного массива

от забоя. Влияние этого отставания на ϵ_y и полуобжатие пласта ν несколько сказалось лишь у кромки пласта. Результаты исследований приведены в таблице.

Характеристики	Отставание закладочного массива от забоя, м			
	0	2,5	5,0	7,5
ϵ_y , тс/м ²	1581	1731	1763	1794
ν , мм	145	149	153	155

Из таблицы следует, что отставание закладочного массива от забоя на 7,5 м увеличивает концентрацию напряжений ϵ_y от 1,58 до 1,79, т.е. всего на 13%, а обжатие пласта увеличивается на 7%. Таким образом, отставание закладочного массива до 7,5 м с максимальной усадкой 15% практически мало влияет на напряженно-деформированное состояние краевой части угольного пласта.

Было исследовано также влияние отставания закладочного массива при применении закладки с усадкой в 5%. В результате получено, что отставание закладочного массива (с усадкой 5%) на 5 м не влияет на напряженно-деформированное состояние краевой части угольного пласта.

Следовательно, влияние отставания закладочного массива от забоя сказывается лишь при применении закладочных материалов с большой усадкой; применение же плотной закладки с небольшим процентом усадки снижает или вообще уничтожает влияние отставания закладки на напряженно-деформированное состояние краевой части угольного пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д и н н и к А. Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты. - "Инженерный работник", 1925, № 7, с. 26-31.
2. М а т в е е в Б. В. Руководство по проведению испытаний слабых боковых пород на боковой распор. Л., ВНИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела, 1961.
3. И л ь ш т е й н А. М., Л и б е р м а н Ю. М., М е л ь н и к о в Е. А. и др. Методы расчета целлков и потолочин камер рудных месторождений. М., "Наука", 1964.
4. Г у с е л ь н и к о в Л. М., М ы л ь н и к о в А. А., Ф у р л е т о в И. А. Определение коэффициента бокового распора в природных условиях. - В сб. "Измерение напряжений в массиве горных пород". Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1974, с. 12-15.

5. Б г о р о в П. В. Исследование напряженного состояния нетронутого массива осадочных пород в Кузбассе. - В сб. "Измерение напряжений в массиве горных пород", ч.П. Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1974, с. 3-10.

6. Р у п п е н е й т К. В. Механические свойства горных пород. М., Углетехиздат, 1956.

7. Б е р о н А. И. и др. Исследование прочности и деформируемости горных пород. М., "Наука", 1973.

8. Е р ж а н о в Ж. С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. Алма-Ата, "Наука", 1964.

9. П е р к о в Ю. Р., Д о л г и х М. А. Опыт сравнительного определения модуля упругости горных пород в лабораторных и полевых условиях. - "Основания, фундаменты и механика грунтов", 1965, № 3, с. 21-23.

10. Т а р а с о в а И. В., Р у п п е н е й т К. В. Механическая модель трещиноватого массива. - "Гидротехническое строительство", 1970, № 1, с. 8-10.

11. Л и б е р м а н Ю. М., Х а ш м о в а - М а л ь к о в а Р. И. Методика расчета напряженно-деформированного состояния пород при разработке угольных пластов с закладкой выработанного пространства. М., ИГД им. А.А.Скочинского, 1976.

12. *Winkhaus G.P. Ergebnisse gebirgsdynamischer Forschung in Großbritannien. - „Bergbau-Archiv“, 1949, Bd. 10, S. 155-170.*

13. М у с х е л и ш в и л и Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Изд-во АН СССР, 1949.

14. Л и б е р м а н Ю. М., Х а ш м о в а - М а л ь к о в а Р. И. Давление горных пород на закладочный массив с нелинейной характеристикой усадки. - "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", 1973, № 2, с. 3-7.

15. Д е м и д о в и ч Б. П., М а р о н И. А. Основы вычислительной математики. М., "Наука", 1970.

16. Г а й к о Э. И., Ф е й т Г. Н. Исследование влияния способа управления кровлей гидравлической закладкой на выбороопасность крутых угольных пластов. - "Уголь", 1976, № 6, с. 27-31.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
СВОЙСТВА И СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНОГО ПЛАСТА И ЗАКЛАД- ДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	3
МЕТОД И СХЕМА РАСЧЕТА	II
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРАЕ- ВОЙ ЧАСТИ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧ- НЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ	17
Влияние напряженного состояния нетронутого массива	17
Влияние глубины разработки на напряженно-деформированное состоя- ние краевой части крутого угольного пласта при разработке с за- кладкой выработанного пространства	19
Влияние способа управления кровлей на напряженно-деформированное состояние краевой части крутого угольного пласта	20
Влияние неоднородностей в структуре угольного пласта на напря- женно-деформированное состояние его краевой части	22
Влияние отставания закладочного массива от забоя на напряженно- деформированное состояние краевой части угольного пласта	26
ЛИТЕРАТУРА	27

Юрий Михайлович Либерман,
Раиса Ивановна Хаймова-Малькова

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ КРОВЛЕЙ

Редактор И. А. Дружкова

T-14919 Тираж 500 Цена 14 коп. Изд. № 8492 Заказ 1729

Типография Института горного дела им. А. А. Скочинского
I,8 уч.-изд.л. Подписано к печати 29/VI 1980 г.