Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА
имени
А. А. Скочинского

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

МОСКВА
1980

gost.e-ecolog.ru

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

УДК 622.831.24

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.

© Институт горного дела им. А. А. Скочинского (ИГД им. А. А. Скочинского), 1980

ВВЕДЕНИЕ

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. I): одну, ориентированную по гравитационным силам, и другую, ориентированную по залеганию пласта.

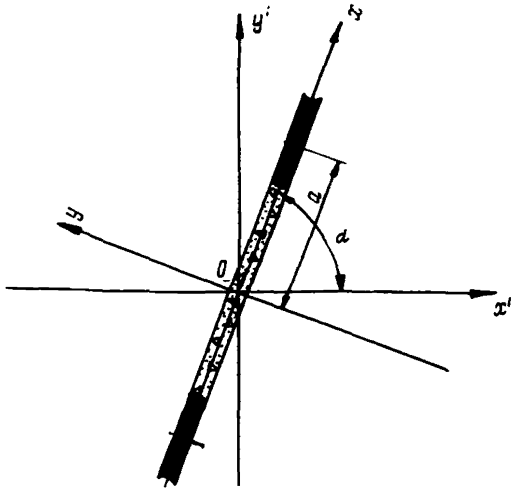


Рис. I. Схема расположения очистной выработки

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

$$\begin{aligned} \sigma^0_{y'} &= \gamma (H - y') ; \\ \sigma^0_{x'} &= \beta \gamma (H - y') ; \\ \tau^0_{x'y'} &= 0 , \end{aligned} \qquad (I)$$

где H – глубина залегания пласта в центре очистной выработки;

β – коэффициент бокового распора.

Компоненты напряжений σ^0_y, σ^0_x и τ^0_{xy} относительной наклонной системы координат xy определяются из выражений

$$\begin{aligned} \sigma^0_y &= p \gamma (H - x \sin\alpha - y \cos\alpha) ; \\ \sigma^0_x &= q \gamma (H - x \sin\alpha - y \cos\alpha) ; \\ \tau^0_{xy} &= t \gamma (H - x \sin\alpha - y \cos\alpha) , \end{aligned} \qquad (2)$$

где α – угол падения пласта;

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

$$q = \frac{1+\beta}{2} + \frac{1-\beta}{2} \cos 2\alpha;$$
$$t = \frac{1-\beta}{2} \sin 2\alpha. \qquad (3)$$

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

$$\beta = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \qquad (4)$$

Основываясь на данных натурных 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 натурных 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 синклинория 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 Араличевского 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

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

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 Ж.С.Ержанова [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 прессиометра [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:

$$E = E_{упр} / K. \qquad (6)$$

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

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

II тип

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

III тип

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

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.

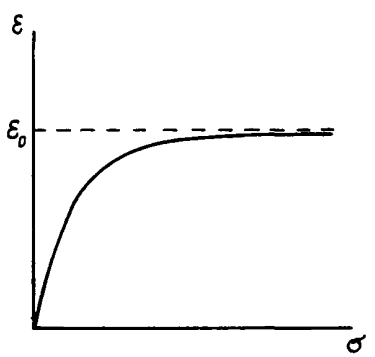


Рис. 2. График зависимости деформации от напряжения для материалов I типа

Зависимость II типа (рис. 3) наиболее характерна для углей, обнаруживающих при одноосном сжатии псевдопластические деформации. Параметр σ_0 приближенно 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 $E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$.

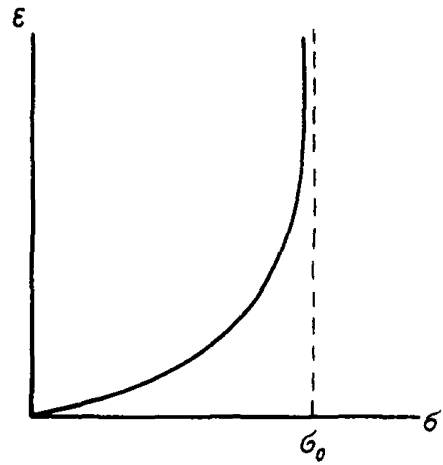


Рис. 3. График зависимости деформации от напряжения для материалов II типа

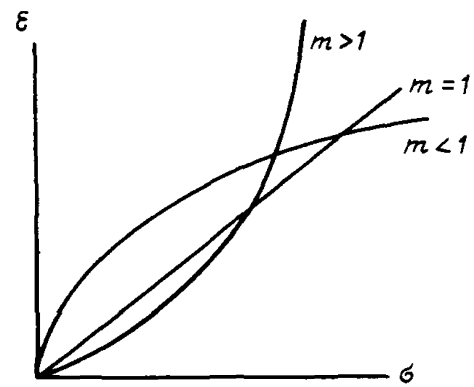


Рис. 4. График зависимости деформации от напряжения для материалов III типа

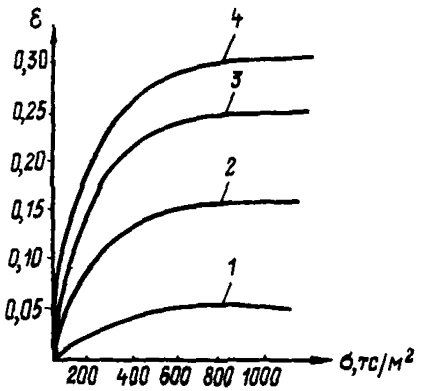


Рис. 5. Компрессионные кривые реальных закладочных материалов с различными характеристиками:

I – пески реки Обь (ε_0 = 0,051, σ_0 = 345 тс/м^2); 2 – Кузбасские породы с Голубевского карьера (ε_0 = 0,155, σ_0 = 244 тс/м^2); 3 – породы вскрыши угольных карьеров Прокопьевско-Киселевского района (ε_0 = 0,25; σ_0 = 200 тс/м^2); 4 – породы Кузнецкой свиты (ε_0 = 0,31; σ_0 = 180 тс/м^2)

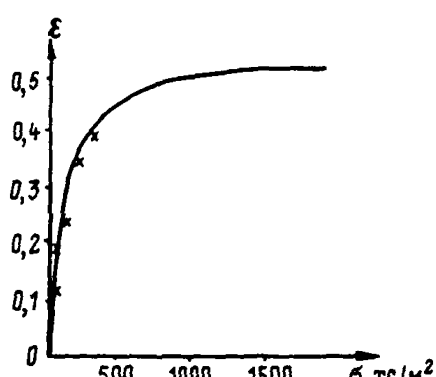


Рис. 6. Компрессионная кривая обрушенных пород

Типичные компрессионные кривые закладочных материалов [II], 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

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

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 [I2]. Построенная здесь по уравнению (5) кривая соответствует $\varepsilon_0 = 0{,}5$ и $\sigma_0 = 200$ 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 $\varepsilon_0^{об} = 0{,}5$.

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 [I3]. Плоскость сечения выработки проводится вкрест 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

$$v_{\gamma H}(x) - v_{\sigma}(x) = \delta_{\sigma}(x) \| - \delta_{\gamma H}(x), \qquad (II)$$

где $v_{\gamma H}(x)$ – конвергенция кровли – почвы от действия только объемного веса пород;

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

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

$\delta_{\gamma H}(x)$ – 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 $-a \le x \le a$ 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 $v(x)$.

Величину смещений $v_{\gamma H}(x)$ определяем, исходя из формул теории упругости [I3]:

$$\frac{E}{1+\nu}(u + iv) = (3 - 4\nu)\,\varphi(z) - \varphi(\bar{z}) - (z - \bar{z})\overline{\Phi(z)}, \qquad (I2)$$

где $z = x + iy$; $\bar{z} = x - iy$;

v – смещение по направлению оси y;

u – смещение по направлению оси x;

E – модуль деформации массива;

ν – коэффициент Пуассона массива.

Функция $\varphi(z)$ определяется из соотношения

$$\varphi(z) = \int \Phi(z)\, dz, \qquad (I3)$$

где $\Phi(z)$ – функция напряжений.

Выражение для этой функции получено нами ранее [I4] в виде

$$\Phi(z)=\frac{\gamma H}{2}(p-it)\left[\left(\frac{z}{\sqrt{z^2-a^2}}-1\right)\left(1-z\frac{\sin\alpha}{H}\right)+\frac{a^2\sin\alpha}{2H\sqrt{z^2-a^2}}\right]. \qquad (I4)$$

Вычисляя интеграл (I3), получаем

$$\varphi(z)=\frac{\gamma H}{2}(p-it)\left(\sqrt{z^2-a^2}-z\right)\left(1-\frac{z}{2H}\sin\alpha\right). \qquad (I5)$$

Конвергенцию $v_{\gamma H}(x)$ по линии угольного пласта, т.е. при $y=0$, и, следовательно, при $z=\bar{z}$, можно определить по формуле (I2). В результате подстановки формулы (I5) получим в пределах $|x|\leq a$

$$v_{\gamma H}(x)=\frac{4(1-\nu^2)p\gamma H}{E}\left(1-\frac{x}{2H}\sin\alpha\right)\sqrt{a^2-x^2}, \qquad (I6)$$

причем p 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 щелевидной выработки приложено искомое нормальное давление $\sigma(x)$. Сначала считаем, что оно приложено на бесконечно малой длине $d\xi$ с координатой середины площадки $x=\xi$. Расхождение кровли – почвы dv 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

$$dv=K(x,\xi)\sigma(\xi)d\xi, \qquad (I7)$$

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

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

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

$$= \sum_{k=1}^{n} \sigma_k D_k(x) .$$

Здесь n – количество равных интервалов разбиения участка;

ξ_k; ξ_{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.

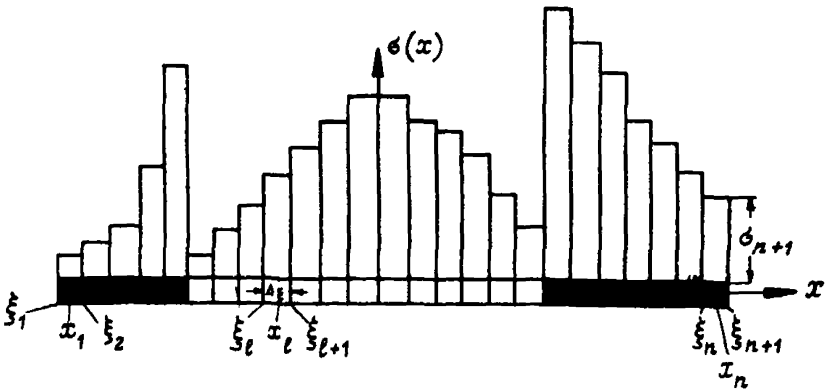


Рис. 7. Расчетная схема к определению давлений на уголь и закладку

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

$$D_k(x) = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E}\left[2\left(\arccos\frac{\xi_k}{a} - \arccos\frac{\xi_{k+1}}{a}\right)\sqrt{a^2-x^2} + \right.$$

$$\left. + \left(\xi_k - x\right) \ln \frac{a^2 - \xi_k x - \sqrt{\left(a^2-\xi_k^2\right)\left(a^2-x^2\right)}}{a^2 - \xi_k x + \sqrt{\left(a^2-\xi_k^2\right)\left(a^2-x^2\right)}} - \right.$$

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

Для вычисления обжатия закладки и угля, т.е. правых частей уравнения (II), применим обобщенную гипотезу Винклера [I4], согласно которой обжатие зависит только от давления, действующего в той же точке. Математически это выражается в виде

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

где $\varepsilon_i(\sigma)$ – деформация, уравнение которой выбирается для закладки и угля из выражений (7)–(9);

h – мощность пласта.

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

$$\delta_{\gamma H}(x) = \varepsilon_i \left[p \gamma H \left(1 - \frac{x}{H} \sin\alpha\right)\right] \cdot h , \qquad (21)$$

где ε_i – деформация угля, уравнение которой выбирается для угля из выражений (7)–(9); i – номер, соответствующий уравнению, – причем вместо σ туда подставляется $p\gamma H \left(1 - \frac{x}{H} \sin\alpha\right)$.

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

$$\frac{4(1-\nu^2)\, p \gamma H}{E} \left(1 - \frac{x}{2H} \sin\alpha\right) \sqrt{a^2 - x^2} - \sum_{k=1}^{n} \Pi_k(x) \sigma_k =$$

$$= h \varepsilon_i(\sigma) \Big\| - h \varepsilon_i \left[p \gamma H \left(1 - \frac{x}{H} \sin\alpha\right)\right] . \qquad (22)$$

Требуя выполнения уравнения (22) в дискретном множестве точек

$$x_\ell = \frac{1}{2}\left(\xi_\ell + \xi_{\ell+1}\right) ,$$

Получим дискретный аналог этого уравнения в виде системы

$$\sum_{k=1}^{n} D_k(x_\ell)\,\sigma_k + h\,\varepsilon_i(\zeta_\ell) = \frac{4(1-\nu^2)\,p\gamma H}{E}\left(1-\frac{x_\ell}{2H}\sin\alpha\right)\sqrt{a^2-x^2}\,\Big\| + \tag{23}$$

$$+\,h\,\varepsilon_i\left[p\gamma H\left(1-\frac{x_\ell}{H}\sin\alpha\right)\right],$$

$$(\ell = 1, 2, \ldots, n).$$

Уравнение (23) в развернутом виде представляет собой систему из n уравнений с n неизвестными. В левой части этой системы σ входит как линейно, так и нелинейно – через члены с $\varepsilon_i(\zeta_\ell)$. Поэтому решение данной системы уравнений следует производить методом Ньютона-Рафсона [I5]. На $(m+1)$-м шаге итерационного процесса этого метода решается линейная алгебраическая система уравнений относительно неизвестных $\Delta\sigma_k^{(m+1)}$:

$$\sum_{k=1}^{n}\left[D_k(x_\ell) + h\,\varepsilon_i'(\zeta_\ell)\,\delta_{k\ell}\right]\Delta\sigma_k^{(m+1)} =$$

$$= v_{\gamma H}(x_\ell) - h\,\varepsilon_i(\zeta_\ell) - \sum_{k=1}^{n} D_k(x_\ell)\,\sigma_k^{(m)}\Big\| +$$

$$+\,h\,\varepsilon_i\left[p\gamma H\left(1-\frac{x_\ell}{H}\sin\alpha\right)\right] \tag{24}$$

$$(\ell = 1, 2, \ldots, n),$$

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 σ_y, направленные перпендикулярно линии угольного пласта, и конвергенция пород кровли и почвы $v = \varepsilon h$ 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 70^0, разрабатываемый на глубине 400 м с закладкой выработанного пространства, компрессионные характеристики которой приняты близкими к аналогичным характеристикам гидрозакладки, а именно: $\varepsilon_0 = 0{,}15$ и $\sigma_0 = 200$ 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 $\beta = 0{,}5$ $\sigma_y^{max} = 1250$ 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 $v = 55$ 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 v 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 $\alpha = 0$.

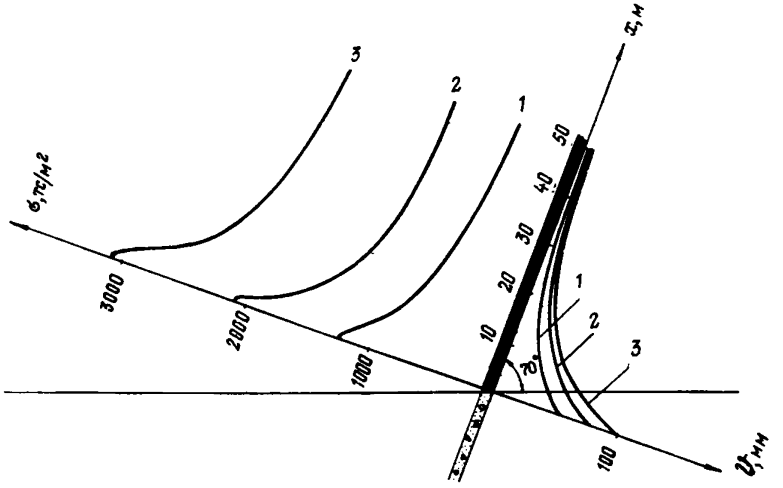


Рис. 8. Эпюры опорного давления σ_y и смещений v в угольном пласте при различных коэффициентах бокового распора β:

I - 0,5; 2 - I,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 $\beta = I$, учтя, что при $\beta = 2$ опорное давление увеличивается, а при $\beta = 0,5$ уменьшается по сравнению с $\beta = I$. Остальные параметры, входящие в расчет, примем следующими: $H = 400$ м; $\alpha = 70^0$; $h = 3$ м, $E_{порол} = 200000$ тс/м^2, $E_{уг} = 20000$ тс/м^2; $\nu = 2,5$, $a = 100$ м, $\varepsilon_0 = 0,15$; $\sigma_0 = 200$ тс/м^2, $\gamma = 2,5$ тс/м^3.

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.

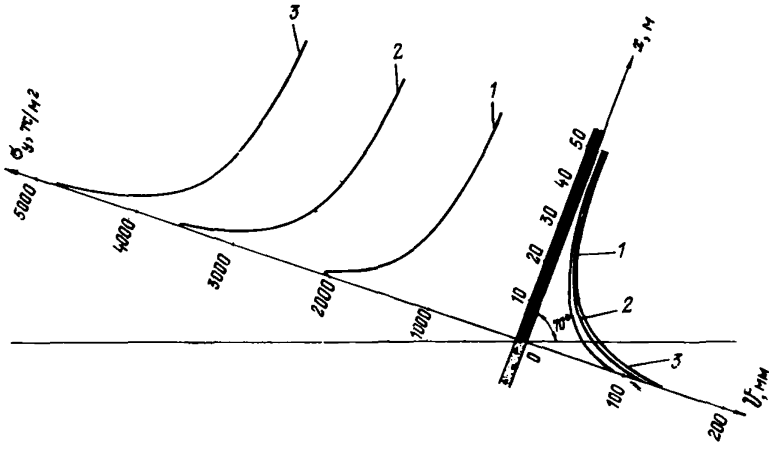


Рис. 9. Эпюры напряжений σ_y и смещений v на различных глубинах разработки:

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 γH = 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 v 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.

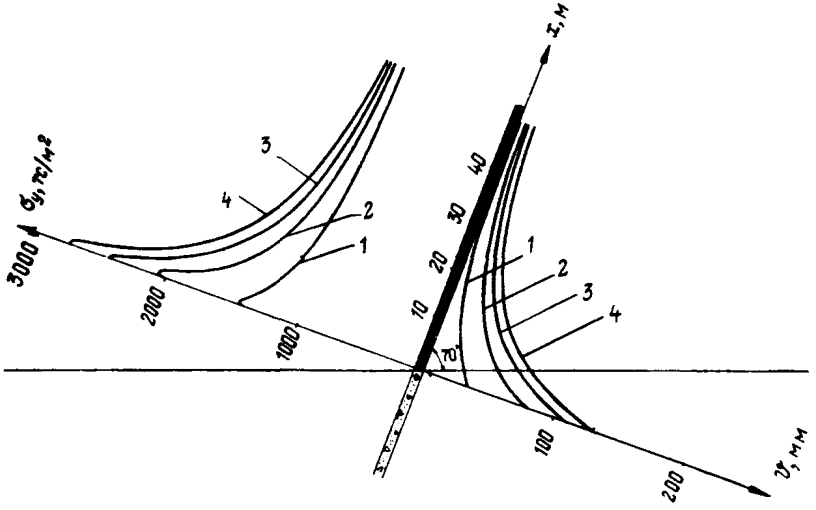


Рис. 10. Эпюры напряжений σ_y и смещений v в угольном пласте в зависимости от максимального уплотнения ε_0 закладочных материалов и обрушенных пород при σ_0 = 200 тс/м²:

1 - 0,05; 2 - 0,15; 3 - 0,25; 4 - 0,5 (обрушенные породы)

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 $2{,}8\,\gamma H$, в то время как закладка с усадкой в 5% уменьшает опорное давление до $1{,}4\,\gamma H$. 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 $v =$ = 115 мм.

На глубине разработки 1200 м при способе управления кровлей полным обрушением опорное давление у кромки угольного пласта увеличивается до 7200 тс/м^2, 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 v при применении закладки с усадкой 5% на глубине разработки 1200 м. В этом случае опорное давление у кромки снижается до 3400 тс/м^2, 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].

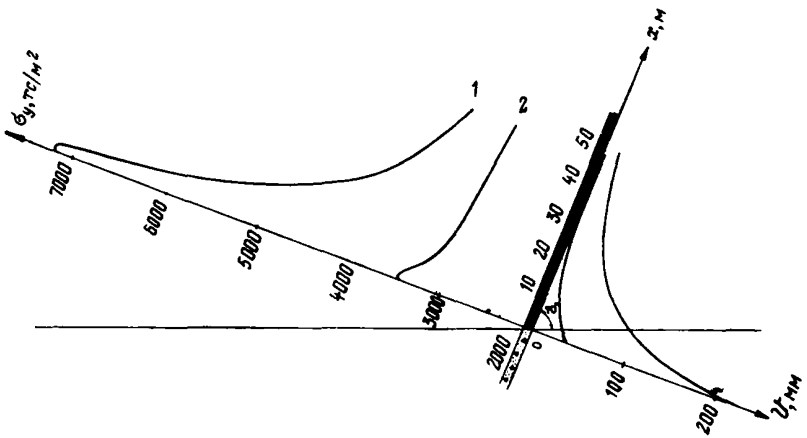


Рис. II. Эпюры напряжений σ_y и кривые смещений v в краевой части угольного пласта на глубине разработки 1200 м:

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. I2 представлены эпюры напряжений σ_y и полуобжатий пласта v с неоднородностью протяженностью в I м в краевой части пласта. Неоднородность слабее, чем угольный пласт, и модуль упругости ее E = 2000 тс/м^2, т.е. в I0 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 (I600 тс/м^2).

Теперь рассмотрим случай, когда неоднородность с теми же свойствами, что и в предыдущем случае, расположена на расстоянии I м в глубь пласта, а по ширине занимает 0,5 м (рис. I3). В этом случае, как показано на рисунке, в месте расположения слабой неоднородности происходит спад напряжений до I050 тс/м^2, а у края пласта подъем σ_y до I700 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 тс/м^2) на протяжении I м, затем имеется геологическое нарушение - пустота (0,5 м), а далее проходит угольный пласт с E = 20000 тс/м^2 (рис. I4). В этом случае в месте нарушения происходит резкий спад напряжений до нуля, а затем подъем до I650 тс/м^2, т.е. большой градиент изменения напряжений, что может оказаться опасным с точки зрения внезапных выбросов угля и газа.

На рис. I5 представлен случай с жесткой неоднородностью, расположенной на расстоянии I м от забоя, с модулем упругости E = 200000 тс/м^2, т.е. в I0 раз большим, чем у 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 выбросоопасных угольных пластов (рис. I6).

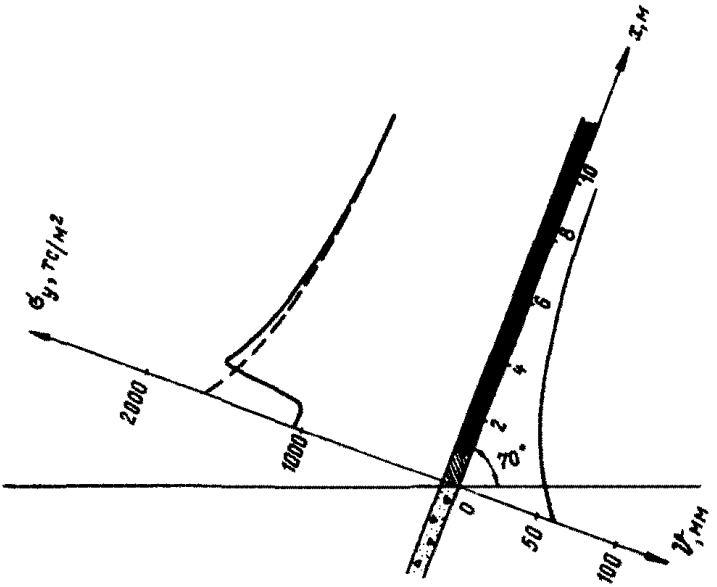


Рис. I2. Эпюры напряжений σ_y и смещений v в угольном пласте при наличии у кромки пласта слабого угля

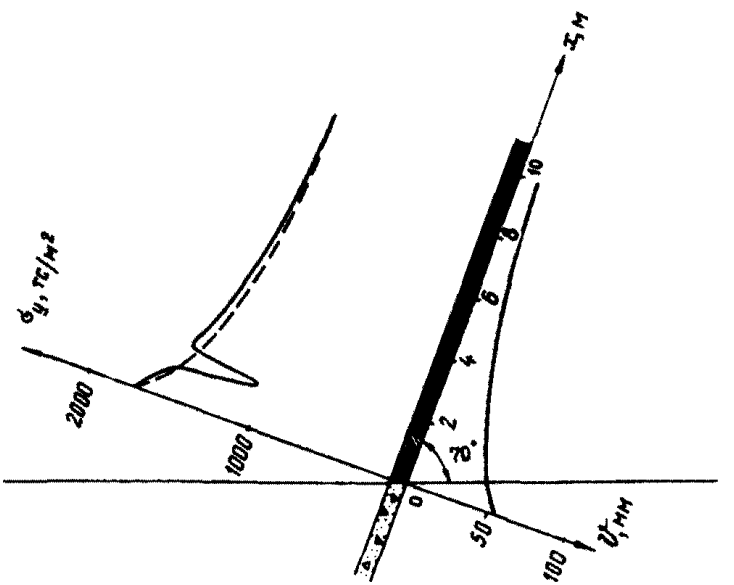


Рис. I3. Эпюры напряжений σ_y и смещений v в угольном пласте при наличии слабой неоднородности на расстоянии I м от забоя

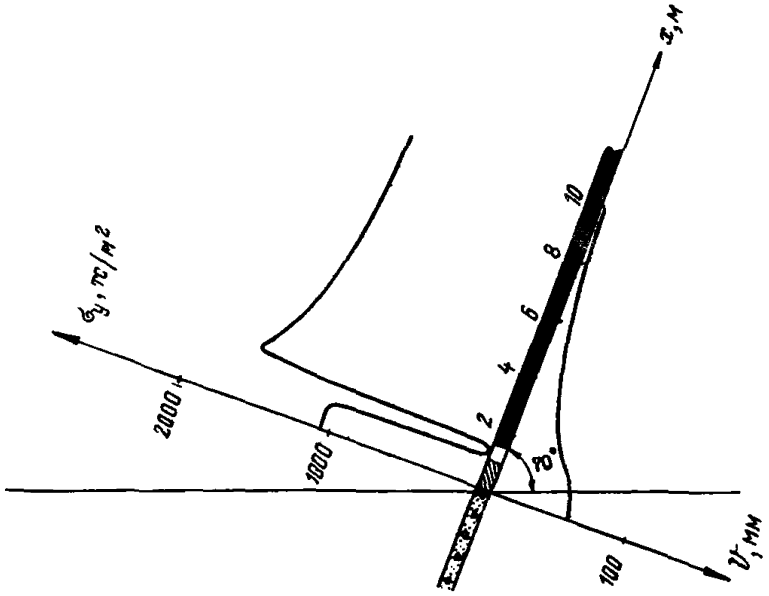


Рис. 14. Эпюра напряжений σ_y и кривая смещений v в случае геологического нарушения в краевой части угольного пласта

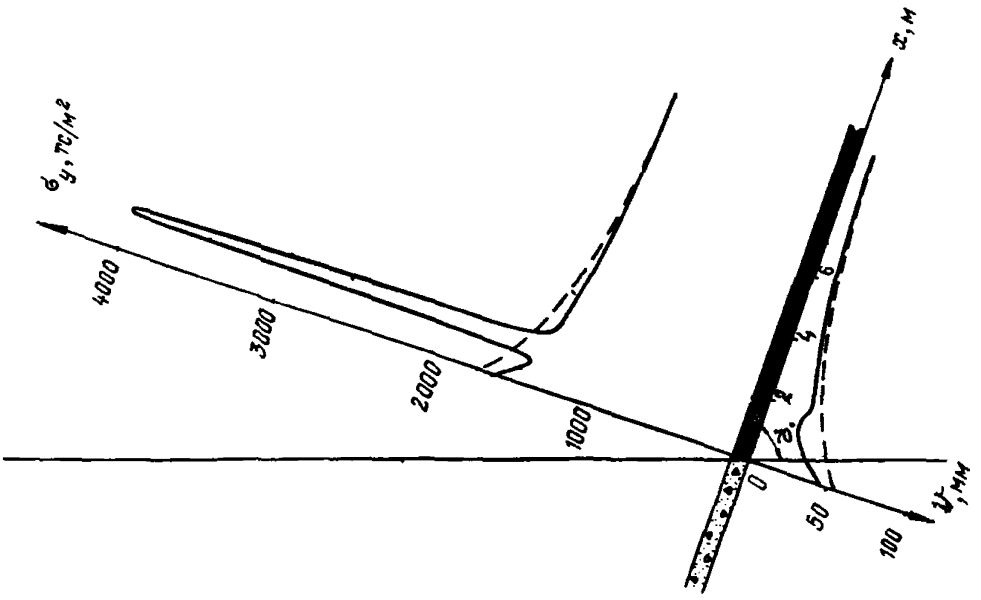


Рис. 15. Эпюры напряжений σ_y и смещений v в угольном пласте при наличии в нем жесткого включения:

сплошная линия – пласт с включением, пунктирная – однородный пласт

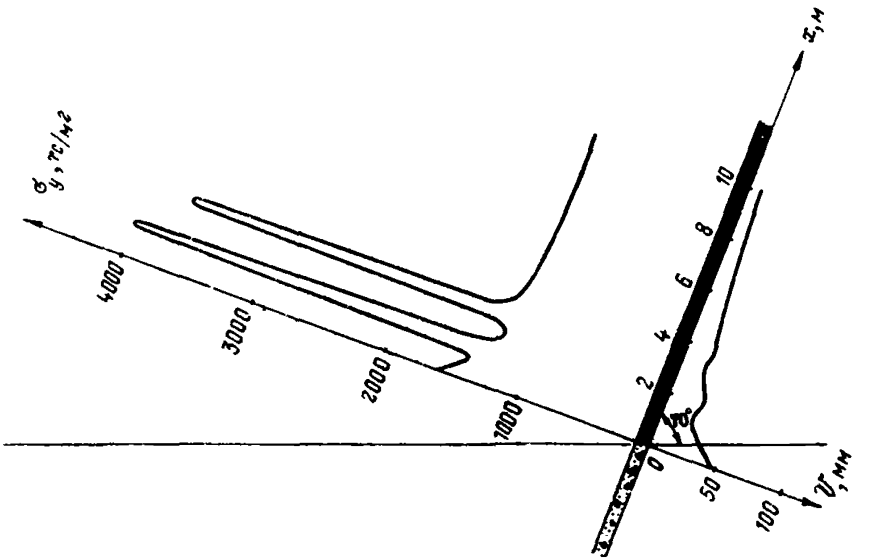


Рис. 16. Эпюра напряжений σ_y и смещений v в краевой части угольного пласта с двумя жесткими неоднородностями

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 $\varepsilon_0 = 0{,}15$, $\sigma_0 = 200$ 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 σ_y и полуобжатие пласта v 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
σ_y, тс/м^2	I58I	I73I	I763	I794
v, мм	I45	I49	I53	I55

Из таблицы следует, что отставание закладочного массива от забоя на 7,5 м увеличивает концентрацию напряжений σ_y от I,58 до I,79, т.е. всего на I3%, а обжатие пласта увеличивается на 7%. Таким образом, отставание закладочного массива до 7,5 м с максимальной усадкой I5% 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

I. Динник А. Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты. - "Инженерный работник", I925, № 7, с. 26-3I.

2. Матвеев Б. В. Руководство по проведению испытаний слабых боковых пород на боковой распор. Л., ВНИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела, I96I.

3. Ильштейн А.М., Либерман Ю.М., Мельников Е.А. и др. Методы расчета целиков и потолочин камер рудных месторождений. М., "Наука", I964.

4. Гусельников Л. М., Мыльников А.А., Фурлетов И. А. Определение коэффициента бокового распора в натурных условиях. - В сб. "Измерение напряжений в массиве горных пород". Новосибирск, ИГД СО АН СССР, I974, с. I2-I5.

5. Егоров 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. Руппенейт К. В. Механические свойства горных пород. М., Углетехиздат, 1956.

7. Берон А. И. и др. Исследование прочности и деформируемости горных пород. М., "Наука", 1973.

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

9. Перков Ю. Р., Долгих 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. Тарасова И. В., Руппенейт К. В. Механическая модель трещиноватого массива. – "Гидротехническое строительство", 1970, № 1, с. 8–10.

11. Либерман Ю. М., Хаимова-Малькова 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. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Изд-во АН СССР, 1949.

14. Либерман Ю. М., Хаимова-Малькова Р. И. Давление горных пород на закладочный массив с нелинейной характеристикой усадки. – "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", 1973, № 2, с. 3–7.

15. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М., "Наука", 1970.

16. Гайко Э. И., Фейт Г. Н. Исследование влияния способа управления кровлей гидравлической закладкой на выбросоопасность крутых угольных пластов. – "Уголь", 1976, № 6, с. 27–31.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

СВОЙСТВА И СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНОГО ПЛАСТА И ЗАКЛАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ 3

МЕТОД И СХЕМА РАСЧЕТА II

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРАЕВОЙ ЧАСТИ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ I7

Влияние напряженного состояния нетронутого массива I7

Влияние глубины разработки на напряженно-деформированное состояние краевой части крутого угольного пласта при разработке с закладкой выработанного пространства 19

Влияние способа управления кровлей на напряженно-деформированное состояние краевой части крутого угольного пласта 20

Влияние неоднородностей в структуре угольного пласта на напряженно-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 Хаимова-Малькова

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

Редактор И.А.Дружкова

Т-I4919 Тираж 500 Цена I4 коп. Изд. № 8492 Заказ 1179

Типография Института горного дела им.А.А.Скочинского
Подписано к печати 29/VII I980 г.

gost.e-ecolog.ru