

Ордена Октябрьской  
Революции и  
ордена Трудового  
Красного Знамени

**ИНСТИТУТ  
ГОРНОГО  
ДЕЛА**

**ИМЕНИ**

**А. А. СКОЧИНСКОГО**



**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 выбро-соопасных 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.

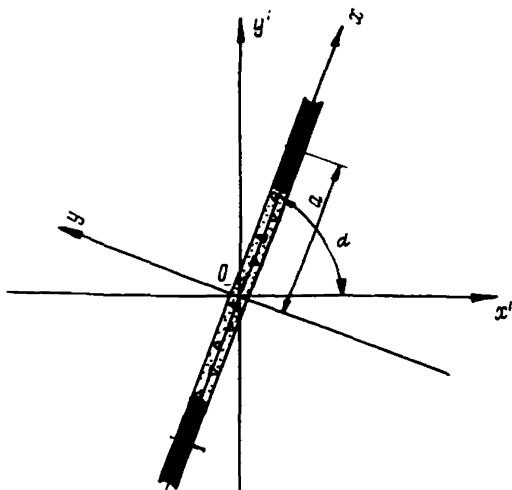


Рис. 1. Схема расположения очистной выработки

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;  
 $\beta$  — коэффициент бокового распора.

Компоненты напряжений  $\sigma_y^0$ ,  $\sigma_x^0$  и  $\tau_{xy}^0$  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  $\alpha$  — 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  $\nu$  [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  $\gamma H$  [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  $t = 0$ ;

$E_\infty$  - 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  $\sigma$  и деформацией  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  - относительная деформация;

$\sigma$  - напряжение;

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

Зависимость I типа (рис. 2) характерна для материалов, нелинейно уплотняющихся. Параметр  $\varepsilon_0$  представляет собой максимальную усадку, а  $\sigma_0$  характеризует крутизну компрессионной кривой. Эта зависимость особенно хорошо отражает свойства закладочных материалов.

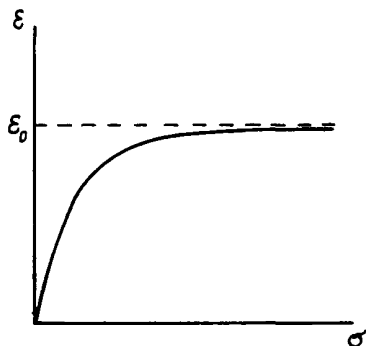


Рис. 2. График зависимости деформации от напряжения для материалов I типа

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

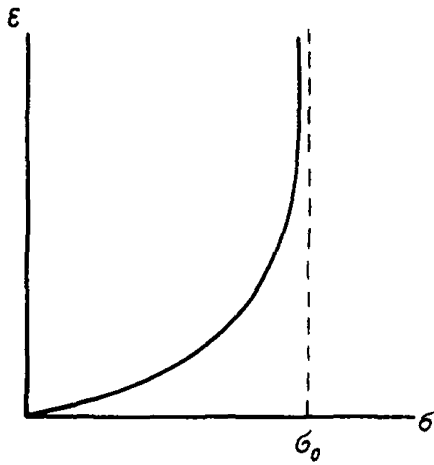


Рис. 3. График зависимости деформации от напряжения для материалов II типа

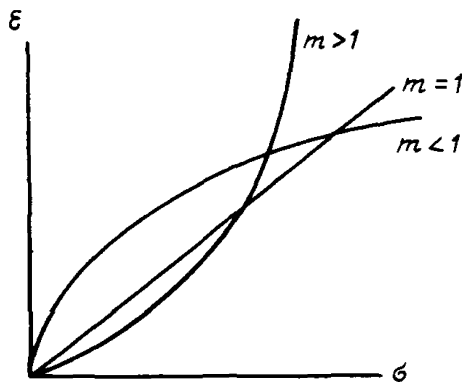


Рис. 4. График зависимости деформации от напряжения для материалов III типа

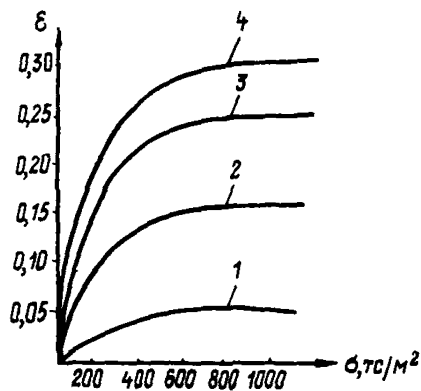


Рис. 5. Компрессионные кривые реальных закладочных материалов с различными характеристиками:

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

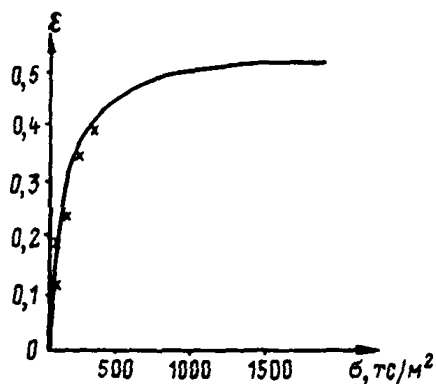


Рис. 6. Компрессионная кривая обрушенных пород

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  $\varepsilon$  от  $\sigma$  для слоя обрушенных пород принимается, как и для закладки, но величина  $\varepsilon_0$  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 вкrest 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

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

где  $\psi_{\text{гн}}(x)$  — 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  $\sigma(x)$ ;

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

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

где  $z = x + iy$ ;  $\bar{z} = x - iy$ ;

$\nu$  — смещение по направлению оси  $y$ ;

$\mu$  — смещение по направлению оси  $x$ ;

$E$  — модуль деформации массива;

$\nu$  — коэффициент Пуассона массива.

Функция  $\varphi(z)$  определяется из соотношения

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

где  $\phi(z)$  — функция напряжений.

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

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

Вычисляя интеграл (13), получаем

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

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  $|x| \leq a$

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

причем  $\rho$  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  $\xi$  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;  
 $\sigma_k$  - среднее значение искомого давления на  $k$ -м интервале. Эта расчетная схема изображена на рис. 7.

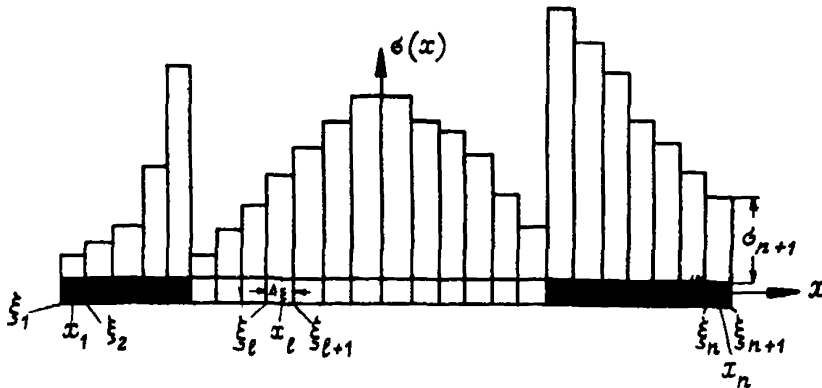


Рис. 7. Расчетная схема к определению давлений на уголь и закладку

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

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

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

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

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

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

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

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

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  $\phi$  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  $\phi_y$ , 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  $\beta$ , 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  $70^\circ$ , 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  $\text{тс/м}^2$ . 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  $3100 \text{ тс/м}^2$ , 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  $\sigma_y$  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  $\alpha = 0$ .

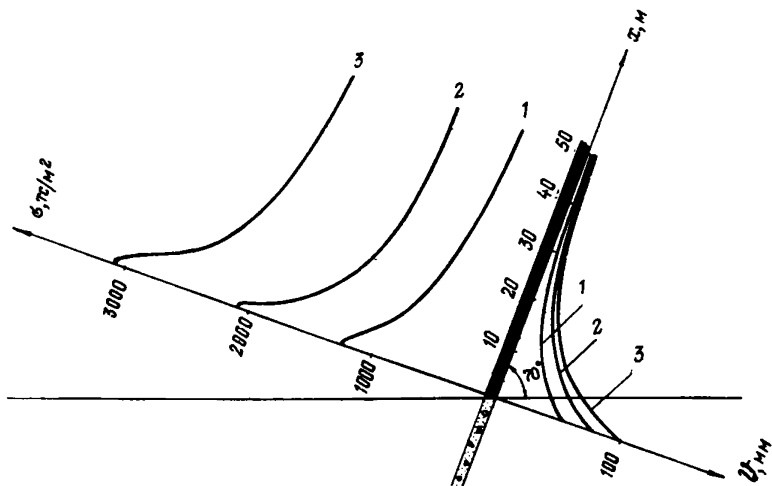


Рис. 8. Эпюры опорного давления  $\sigma_y$  и смещений  $u$  в угольном пласте при различных коэффициентах бокового распора  $\beta$ :

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,  $E_{\text{порол}} = 200000$  тс/м<sup>2</sup>,  $E_{\text{угл.}} = 20000$  тс/м<sup>2</sup>;  $\nu = 2,5$ ,  $\rho = 100$  м,  $\epsilon_0 = 0,15$ ;  $\sigma_0 = 200$  тс/м<sup>2</sup>,  $\gamma = 2,5$  тс/м<sup>3</sup>.

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.

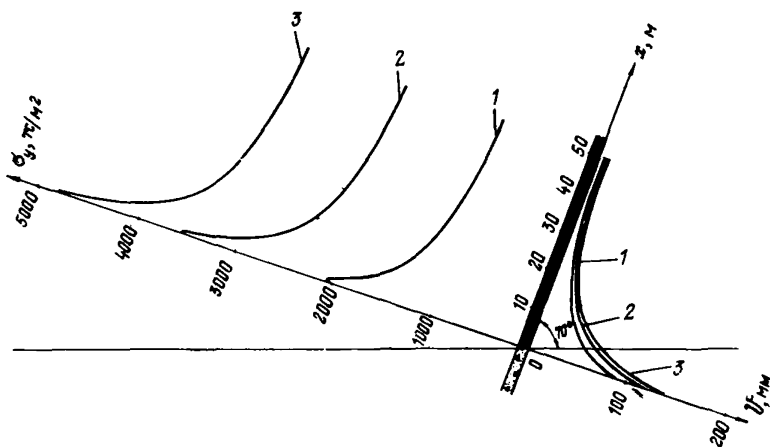


Рис. 9. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  и смещений  $\psi$  на различных глубинах разработки:

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  $\text{тс/м}^2$ , 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  $\gamma H = 1000$   $\text{тс/м}^2$ , а при  $H = 1200$  м оно увеличивается до 3000  $\text{тс/м}^2$ . 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  $\sigma_y$  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  $\sigma_y$  и смещения  $\psi$  в краевой части угольного пласта.

Основным компрессионным параметром, влияющим на напряженно-деформированное состояние угля, является  $\epsilon_0$ , т.е. максимальная усадка закладочных материалов или обрушенных пород.

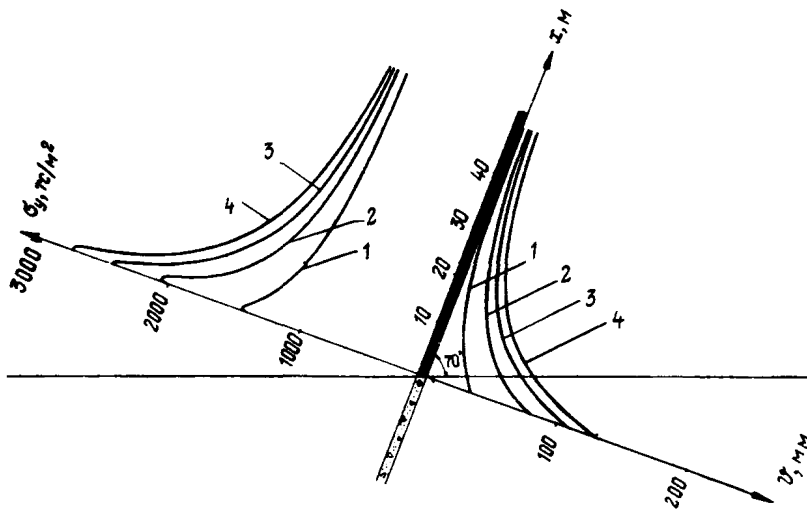


Рис. 10. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  и смещений  $\psi$  в угольном пласте в зависимости от максимального уплотнения  $\epsilon_0$  закладочных материалов и обрушенных пород при  $\sigma_0 = 200$  тс/м<sup>2</sup>:

Для вывода закономерностей влияния компрессионного параметра  $\varepsilon_0$  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  $\sigma_y$  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  $\psi = 115$  мм.

На глубине разработки 1200 м при способе управления кровлей полным обрушением опорное давление у кромки угольного пласта увеличивается до 7200 тс/м<sup>2</sup>, 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  $\sigma_y$  и кривые  $\psi$  при применении закладки с усадкой 5% на глубине разработки 1200 м. В этом случае опорное давление у кромки снижается до 3400 тс/м<sup>2</sup>, 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].

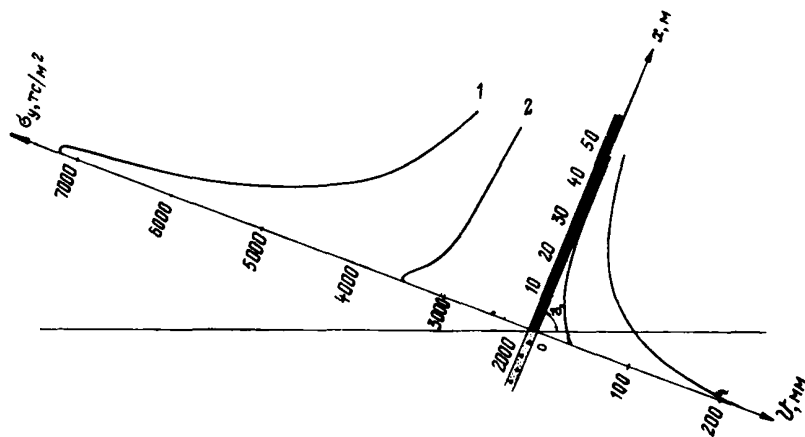


Рис. 11. Эпюры напряжений  $\sigma_x$  и кривые смещений  $\psi$  в краевой части угольного пласта на глубине разработки 1200 м:

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  $\sigma_y$  и полуобжатий пласта  $\psi$  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 ( $1600 \text{ тс/м}^2$ ).

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  $1050 \text{ тс/м}^2$ , а у края пласта подъем  $\sigma_y$  до  $1700 \text{ тс/м}^2$ .

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  $1650 \text{ тс/м}^2$ , 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 у угля. В этом случае в краевой части угольного пласта, в месте расположения жесткой неоднородности, опорное давление резко поднимается до  $4000 \text{ тс/м}^2$  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  $\sigma_y$ , что очень нежелательно для выско-соопасных угольных пластов (рис. 16).



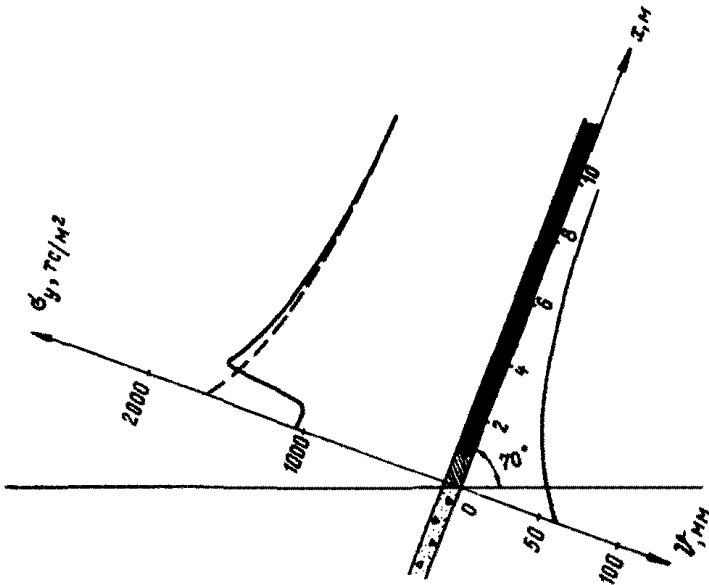


Рис. 12. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  и смещений  $v$  в угольном пласте при наличии у кромки пласта слабого угля

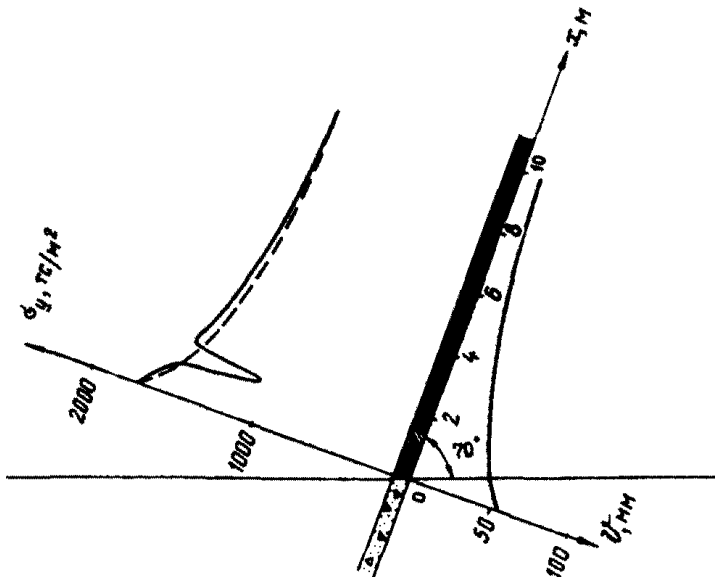


Рис. 13. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  и смещений  $v$  в угольном пласте при наличии слабой неоднородности на расстоянии 1 м от збоя

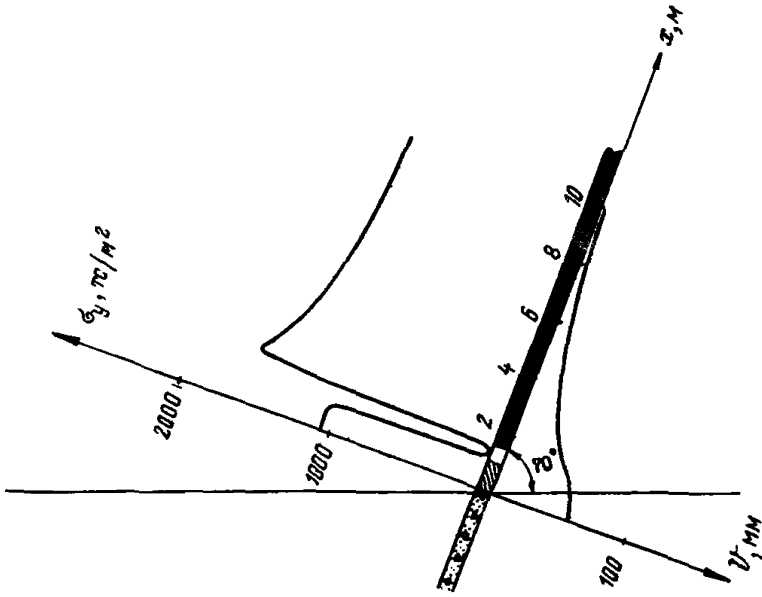


Рис. 14. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  и кривая смещений  $\psi$  в случае геологического нарушения в краевой части угольного пласта

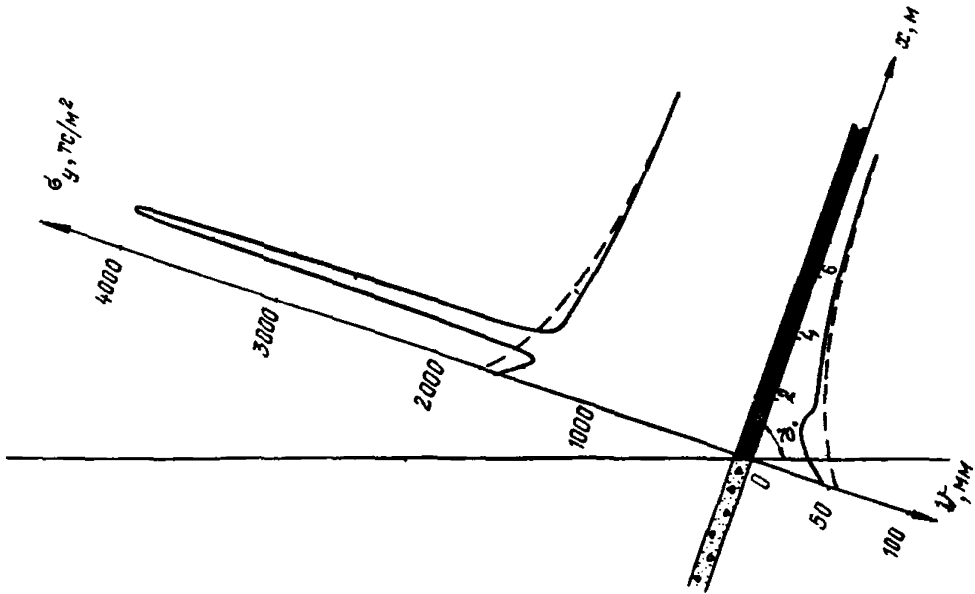


Рис. 15. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  и смещений  $\psi$  в угольном пласте при наличии в нем жесткого включения:

сплошная линия - пласт с включением, пунктирная - однородный пласт

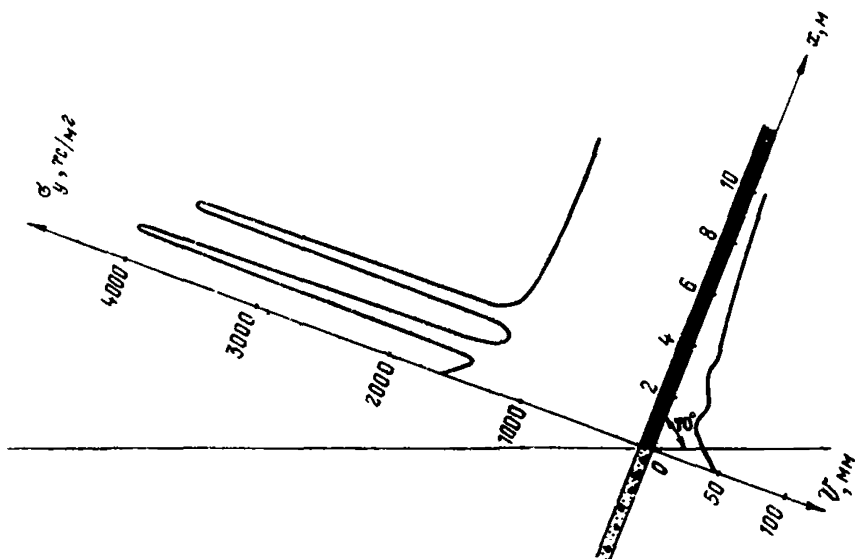


Рис. 16. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  и смещений  $\psi$  в краевой части угольного пласта с двумя жесткими неоднородностями

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  $\epsilon_y$  и полуобжатие пласта  $\nu$  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
$\epsilon_y$ , тс/м <sup>2</sup>	1581	1731	1763	1794
$\nu$ , мм	145	149	153	155

Из таблицы следует, что отставание закладочного массива от забоя на 7,5 м увеличивает концентрацию напряжений  $\epsilon_y$  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 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 целлюлов 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. Д 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. Д 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 в 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 ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ 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.