УДК 622.831.312 © С.Ф. Власов, А.А. Сидельников, 2010

С.Ф. Власов, А.А. Сидельников

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЪЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ

RESULTS OF THE 3-D SIMULATION OF THE TRANSVERSALY ISOTOPIC ROCK MASS STRESS STATE AROUND A LONGWALL

Представлены результаты исследования изменения величины вертикальной составляющей горного давления в разрабатываемом пласте впереди очистного забоя. Пошаговое моделирования перемещения лавы в объёмной компьютерной модели слоистого трансверсально-изотропного массива горных пород позволяет установить закономерности формирования напряженного состояния вокруг очистного забоя в зависимости от положения лавы по длине выемочного столба. Установленные закономерности позволяют оценить НДС призабойной части отрабатываемого пласта.

Ключевые слова: *массив, напряженное состояние, моделирование, очистная выработка.*

Введение. Приоритетным направлением развития угольной промышленности Украины является повышение эффективности производственных процессов при снижении общей доли капитальных и эксплуатационных затрат, поэтому в сложившихся экономических условиях на действующих горнодобывающих предприятиях предполагается увеличение объемов добычи угля за счет внедрения высокоэффективных технологий ведения горных работ и использования современной высокопродуктивной горной техники. Однако интенсификация технологии добычи угля определила широкий круг горнотехнических задач, связанных с негативными проявлениями горного давления в подготовительных и очистных выработках, что, в свою очередь, приводит к снижению добычи, увеличению себестоимости угля и значительному повышению уровня аварийности на производстве. Применение высокоэффективных технологий и способов управления горным давлением в очистных выработках требует знания закономерностей распределения напряжений в массиве горных пород в зависимости от положения очистного забоя по длине выемочного столба.

Суть вопроса. В результате движения очистного забоя и увеличения размера выработанного пространства происходит перераспределение напряженно-деформированного состояния в массиве горных пород. Знание закономерности изменения вертикальной составляющей горного давления в призабойной части угольного пласта позволяет оценить напряженное состояние угольного массива впереди очистного забоя, что является важным технологическим параметром, влияющим на процесс выемки полезного ископаемого.

Цель статьи – исследовать закономерности изменения вертикальной составляющей горного давления в разрабатываемом пласте в зависимости от положения лавы по длине выемочного столба на основании результатов пошагового моделирования перемещения очистного забоя в объёмной компьютерной модели слоистого трансверсально-изотропного массива горных пород.

Методика моделирования. Посредством программного пакета SolidWorks 2009 была построена компьютерная модель для условий разработки пласта $С^{н}_{8}$ шахты "Западно-Донбасская" ОАО "Павлоградуголь". Исходные технологические и горно-геологические данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для построения модели

Параметр	Значение
Длина лавы, м	190
Механизированная крепь	КД-80
Угол залегания пласта, град	0-2
Вынимаемая мощность, м	0,95-1,05
Крепь подготовительного штрека	КШПУ-13,2
Наименование пласта	$С^{н}_{8}$
Глубина ведения очистных работ, м	460

Геометрические размеры модели и физико-механические свойства горных пород определялись в соответствии с [1]. Параметры моделирования подробно изложены в [2].

Основная часть. Распределение напряженного состояния горных пород вокруг очистной выработки зависит от положения лавы вдоль выемочного столба и находится во взаимосвязи с механизмом обрушения, который изложен в [2]. Это означает, что качественно и количественно картина распределения напряжений в пласте, как вдоль лавы, так и вдоль выемочного столба, будет изменяться в зависимости от наличия и размеров зависания горных пород в выработанном пространстве. В общем случае зависимость изменения напряжений по длине выемочного столба можно представить в виде

$$\sigma_y = (F(z;L) - P_0)e^{kX} + P_0, X \in [0;+\infty), \qquad (1)$$

где σ_y – вертикальная составляющая горного давления, МПа; $F(z;\ L)$ – функция распределения вертикальной составляющей горного давления на плоскости забоя по длине лавы z в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба L, МПа; P_0 – вертикальная составляющая горного давления в нетронутом массиве на данной глубине ведения очистных работ, МПа; k – показатель затухания напряжения, м$^{-1}$; X – значение в метрах на координатной оси, направленной по длине выемочного столба, $X \in [0; +\infty)$, значение $X = 0$ соответствует плоскости очистного забоя.

Вертикальная составляющая горного давления в нетронутом массиве для данной глубины ведения очистных работ определяется исходя из геостатической теории горного давления, которая в условиях Западного Донбасса хорошо подтверждается опытом ведения горных работ.

$$P_0 = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i H_i,\ МПа,$$

где γ_i – объёмный вес i горной породы, МН/м^3; H_i – мощность слоя i горной породы, м.

Функция $F(z;\ L)$ в промежутке $z \in [-85;\ +85]$ (длина лавы представляет собой промежуток [-95; +95]) описывается прямой линией, которая параллельна оси абсцисс, с разбросом значений не превышающим 10%, т.е. в указанном промежутке вертикальная составляющая горного давления по длине лавы практически не изменяется. Поэтому функция распределения вертикальной составляющей горного давления на плоскости забоя по длине лавы z зависит только от положения очистного забоя вдоль выемочного столба L.

Численные значения параметров, входящих в формулу (1), для условий отработки пласта $С^{н}_{8}$ на шахте "Западно-Донбасская" ОАО "Павлоградуголь" составляют: P_0 = 11,0 МПа; k = 0,15; значение функция $F(z;\ L)$ в промежутке $z \in [-85;\ +85]$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значение функция $F(z;\ L)$ в промежутке $z \in [-85;\ +85]$ в зависимости от положения очистного забоя

Положение забоя, м	$F(L)$, МПа	Величина вариации, %
5	15	±6,6
15	21	±5,0
25	28	±10,0
35	36	±10,0
45	40	±7,2
55	42	±10,0
65	45	±4,5
*S = 0	30	±6,6
S = 1	40	±5,0
S = 2	45	±10,0
S = 3		
S = 4		

*Значение параметра S определяется по формуле (2).

$$4 \geq S = \frac{L - 75 - 30n}{10} \geq 0, \qquad (2)$$

где L – произвольное положение очистного забоя, м, $L \in [75;\ +\infty)$; n – произвольный множитель, который подбирается с тем условием, чтобы неравенство (2) выполнялось, n = 0, 1, 2, ... , N.

Начиная с отметки 75 м, как уже отмечалось в [2], наблюдается явно выраженная периодичность, поэтому для определения значений напряжения на плоскости забоя в произвольном положении лавы вдоль выемочного столба необходимо ввести параметр S, который будет характеризовать положение лавы в пределах одного периода. Исходя из вышеизложенного, этот параметр должен удовлетворять неравенству (2).

Однако принимая во внимание объёмное напряженное состояние и коэффициент структурного ослабления горного массива, согласно теории предельных напряженных состояний (теория прочности Мора-Кулона) переход призабойной части угольного пласта в предельное состояние происходит при достижении вертикальной составляющей горного давления $F(L)$ предельного значения, равного $\sigma^{пр}_y$. При соблюдении условия $F(L) \geq \sigma^{пр}_y$ протяженность предельной области X_0, считая от плоскости забоя вглубь массива вдоль выемочного столба, можно найти, выразив из формулы (1) значение X и приняв $\sigma_y = \sigma^{пр}_y$:

$$X_0 = \frac{1}{k} \ln \frac{F(z;\ L) - P_0}{\sigma_y^{пр} - P_0},\ м. \qquad (3)$$

С учетом (3) формула (1) для случая $F(L) \geq \sigma^{пр}_y$ примет вид

$$\sigma_y = \left(\sigma_y^{пр} - P_0\right) e^{-},\ X \in [X_0; +\infty). \qquad (4)$$

На границе перехода из области предельного состояния в область допустимых нагрузок находится максимум опорного горного давления впереди очистного забоя. Соответственно расстояние от плоскости забоя до этого максимума находится по формуле (3), а из формулы (4) видно, что по абсолютному значению максимум опорного горного давления впереди очистного забоя не может превышать предельно допустимого напряжения, которое возможно для данного напряженно-деформированного состояния горного массива. На плоскости забоя, при наличии в призабойной части угольного массива предельной области, вертикальная составляющая горного давления будет приблизительно равняться пределу прочности на одноосное сжатие угольного пласта в массиве с учетом его трещиноватости, неоднородности и частичной нарушенности. Согласно [3] для таких зон и сильно трещиноватых массивов коэффициент структурного ослабления находится в пределах 0,1-0,3 (большее значение соответствует

нормальносекущей трещиноватости, меньшее – кососекущей).

Для рассматриваемых горно-геологических условий, согласно методике изложенной в [4, 5] был построен паспорт прочности для угля (пласт $C^{н}_{8}$). Для диапазона напряжений, которые действуют в горизонтальной плоскости в призабойной части угольного пласта, предельная величина вертикальной составляющей горного давления $\sigma^{пр}_{y}$ составила 30-36 МПа. Обеспечивая 10% точность расчета, значение $\sigma^{пр}_{y}$ можно принять равным 33 МПа. Тогда, согласно с данными табл. 2 и формулой (1) положение максимума опорного давления будет изменяться от 0 до 4,5 м от плоскости обнажения вглубь массива в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба. Абсолютное значение максимума составит 33 МПа, что приблизительно равно $3P_0$. Графические зависимости распределения напряжений вдоль выемочного столба для участка лавы, который входит в промежуток [-85; +85] представлены на рис. 1-4.

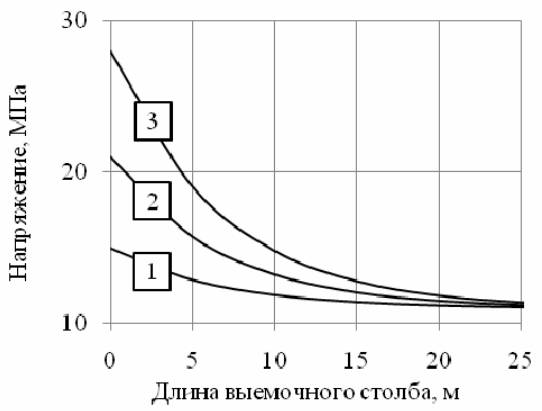

Рис. 1. Распределение вертикальной составляющей горного давления в пласте при отходе лавы от разрезной печи:1 – 5 м; 2 – 15 м; 3 – 35 м

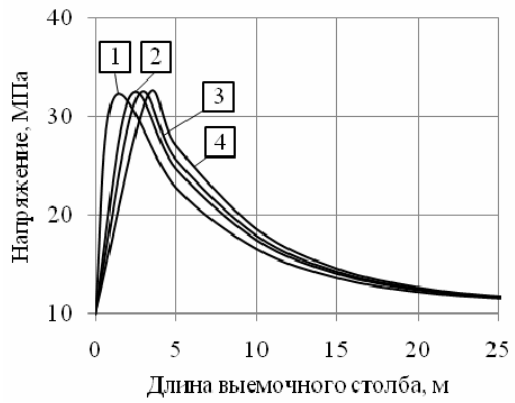

Рис. 2. Распределение вертикальной составляющей горного давления в пласте при отходе лавы от разрезной печи: 1 – 35 м; 2 – 45 м; 3 – 55 м; 4 – 65 м

Из рис. 1-4 видно, что начиная с отметки отхода лавы от разрезной печи 35 м максимум горного давления практически постоянно располагается в массиве на расстоянии 1,2-4,5 м от плоскости очистного забоя. Исключением являются положения лавы, для которых $S = 0$. Необходимо отметить, что при переходе в положение $S = 0$ имеет место переходная зона длиной 3,5-4,5 м, в которой максимум по мере подвигания лавы перемещается к плоскости забоя. После прохождения этой зоны распределение напряжений в пласте соответствует закономерности, представленной на рис. 3.

В промежутках по длине лавы $z \in$ [-95; -85) и (+85; +95], т.е. на расстоянии до 10 м от выемочных штреков в пласте наблюдается несколько иная картина распределения напряжений. Для положения линии очистного забоя до 15-25 м от разрезной печи вертикальная составляющая горного давления на плоскости забоя изменяется от 11,0 до 19,0 МПа. Начиная с отметки отхода 25-35 м давление в плоскости забоя практически не зависит от положения лавы вдоль выемочного столба и составляет 24,0 МПа ± 10%. Исключением являются положения забоя, для которых параметр $S = 0$. Для таких случаев давление на плоскости забоя равняется 18,0 МПа ± 10%. Графики распределения напряжений в пласте угля на концевых 10 м участках лавы в зависимости от положения очистного забоя вдоль выемочного столба представлены на рис. 5.

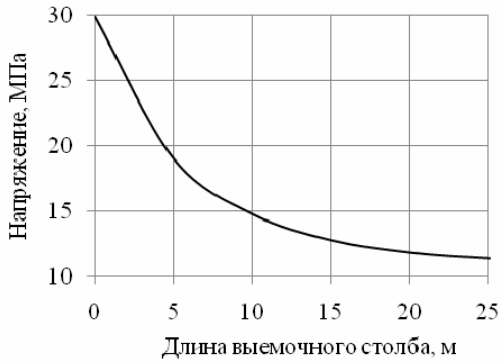

Рис. 3. Распределение вертикальной составляющей горного давления в пласте при S = 0

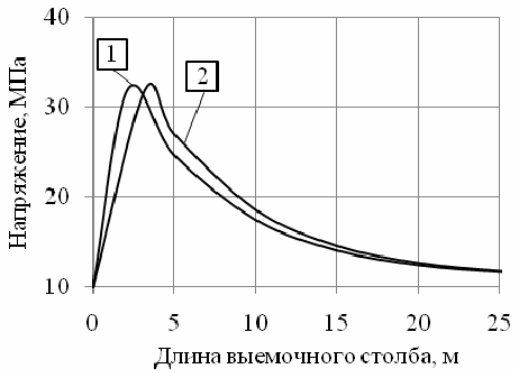

Рис. 4. Распределение вертикальной составляющей горного давления в пласте для положения: 1 – S = 1; 2 – S = 2 – 4

Как видно из рис. 5, на расстоянии 6-8 м от линии очистного забоя вглубь массива на концевых 10-ти метровых участках лавы наблюдается зона разгрузки, в которой вертикальная составляющая горного давления находится в пределах 0,7-0,75P_0. По протяженности эта зона занимает расстояние равное 60-65 м. Это явление объясняется совместным влиянием очистной и подготовительной выработки на краевые участки пласта. По своим деформационным свойствам в направлении действия вертикальной составляющей горного давления уголь в 4 раза превосходит аргиллит, который залегает в почве пласта. Поэтому в указанной области происходит интенсивное “вдавливание” угольного пласта в почву, что вызывает значительное поднятие (пучение) горных пород почвы в сечении штрека. Согласно результатам моделирования величина пучения почвы в створе с лавой для отхода очистного забоя до 45 м составляет 0,05-0,30 м, для последующих положений – 0,40-0,50 м.

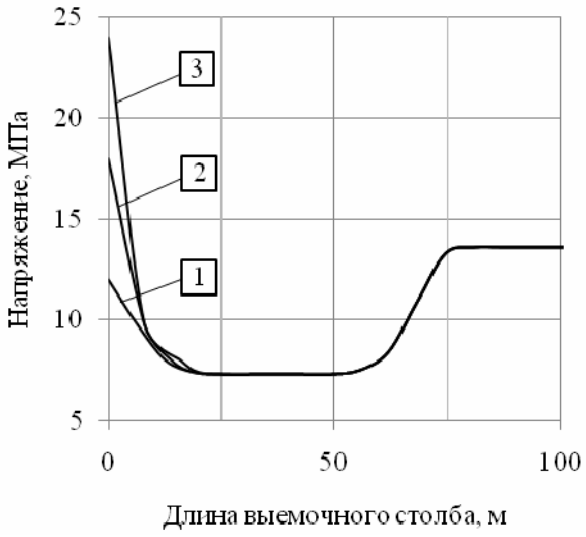

Рис. 5. Распределение напряжений на концевых 10 м участках лавы: 1 – отход лавы до 15 м; 2 – для положений лавы S = 0; 3 – отход лавы более 25 м

Результаты, полученные при моделировании, хорошо согласуются и подтверждаются опытом отработки лав на пласте $C^н_8$ в условиях шахты "Западно-Донбасская". В натурных условиях пучение почвы в подготовительных выработках 864 лавы составляло 0,40-0,60 м. Как и в реальных условиях, в используемой модели горного массива каждый предыдущий слой горных пород является упругим основанием для каждого последующего. При определенном соотношении деформационных свойств этих слоев разгрузка краевых частей лавы от горного давления может происходить различными способами, так в рассматриваемых условиях энергия, запасенная краевым участком упругодеформированного пласта, перешла в работу по выдавливанию пород почвы в полость подготовительной выработки. Этим и объясняется наличие зоны разгрузки в угольном пласте вдоль штрека. Максимальная величина пучения почвы наблюдается в створе с лавой, минимальная – на границе совместного влияния очистного забоя и подготовительной выработки, т.е. на расстоянии 65-70 м от линии забоя и составляет 0,05-0,10 м. Далее наблюдается зона влияния только подготовительной выработки. Вдоль всей длины выемочного штрека начина с отметки 65-70 м от плоскости очистного забоя на ширину до 10 м по бокам выработки тянется область повышенных напряжений, которые вызваны наличием самой полости выработки. В этой области вертикальная составляющая горного давления находится в пределах 1,25-1,35P_0.

Так же, на концевых участках лавы на расстоянии 4-6 м от штрека и на расстоянии до 10 м вглубь отрабатываемого столба от плоскости забоя, в зоне совместного влияния очистной и подготовительной выработки имеет место наличие касательных напряжений, абсолютные значения которых в пласте и в кровле пласта, представленной алевролитом мощностью 8 м, соизмеримы с пределом прочности горной породы на сдвиг (рис. 6).

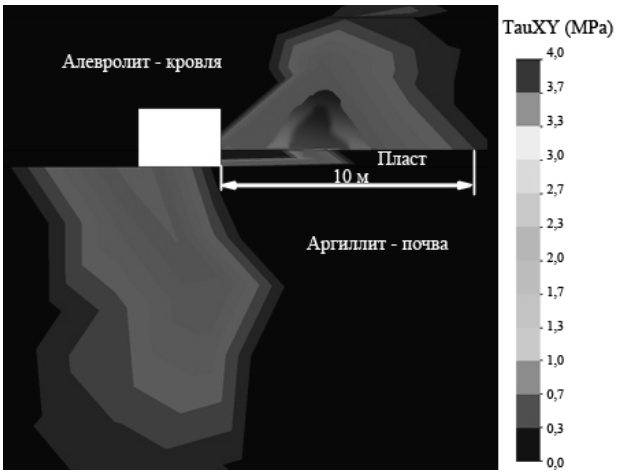

Рис. 6. Распределение касательных напряжений на концевых участках лавы

В указанной области действия касательных напряжений возможен разрыв сплошности горной породы. Натурные исследования, проводимые в 864 лаве, подтверждают наличие секущих трещин как в пласте, так и в кровле. Эти трещины и заколы располагались параллельно оси выемочного штрека на расстоянии 5-8 м от подготовительной выработки, причем свое начало они явно брали в массиве горных пород, который расположен впереди очистного забоя.

Результаты, полученные в ходе моделирования, хорошо согласуются и подтверждаются натурными исследованиями распределения напряженно-деформированного состояния горных пород вокруг очист-

ной выработки. Это означает, что применяемая модель горного массива адекватно и с достаточной для практического применения точностью описывает все процессы перераспределения напряжений, которые происходят в массиве горных пород при выемке полезного ископаемого.

Выводы

В ходе пошагового объёмного компьютерного моделирования:

– установлено, что изменение вертикальной составляющей напряжения в разрабатываемом пласте вдоль выемочного столба, за исключением 10 метровых концевых участков лавы, описывается экспоненциальной зависимостью вида

$$\sigma_y = \left(F(x; L) - 1\right), X \in [0; +\infty),$$

для случая, когда призабойная часть находится в области действия допустимых напряжений; и вида

$$\sigma_y = \left(\sigma_y^{пр} - P_0\right)e^{-kX} + P_0,$$

$$X \in \left[\frac{1}{k} ln \frac{F(L) - P_0}{\sigma_y^{пр} - P_0}; +\infty\right),$$

когда в призабойной части угольного пласта имеет место предельное состояние угольного массива;

– определено, что расстояние от плоскости забоя до точки максимального опорного давления впереди лавы находится по логарифмической зависимости

$$X = \frac{1}{k} ln \frac{F(L) - P_0}{\sigma_y^{пр} - P_0},$$

где $X \geq 0$, при $X < 0$ принимается $X = 0$;

– установлено, что на концевых 10-ти метровых участках лавы давление в плоскости забоя до отметки отхода лавы от разрезной печи 25-35 м возрастает с P_0 до $1{,}8P_0$, а для последующих положений очистного забоя вдоль выемочного столба практически не изменяется и составляет $2{,}0\ P_0 \pm 10\%$;

– определена зона совместного влияния подготовительной и очистной выработки и установлена закономерность распределения напряжений в этой зоне. По длине лавы зона совместного влияния подготовительной и очистной выработки охватывает концевые 10 метровые участки, по длине выемочного столба эта зона распространяется на расстояние 65-70 м от плоскости забоя. Причем в рассматриваемых горно-геологических условиях в этой области наблюдается зона разгрузки, в которой горное давление составляет $0{,}7\text{-}0{,}75P_0$.

Список литературы

1. Сидельников А.А. Обоснование параметров объемного моделирования массива горных пород вокруг очистной и подготовительных выработок / А.А. Сидельников // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. М.С. Полякова НАН Украины. – Д., 2009. – Вып. 82. – С. 77-85.
2. Власов С.Ф. Исследование механизма обрушения пород кровли на объёмной модели слоистого трансверсально-изотропного массива при подвигании очистного забоя / С.Ф. Власов, А.А. Сидельников // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 2. – С. 10-15.
3. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
4. Алексеенко С.Ф. Физика горных пород. Горное давление (Сборник задач и упражнений) / С.Ф. Алексеенко, В.П. Мележик. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1988. – 248 с.
5. Алексеенко С.Ф. Физика горных пород. Горное давление / С.Ф. Алексеенко, В.П. Мележик. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 280 с.

Наведено результати дослідження зміни величини вертикальної складової гірського тиску в пласті, що виймається, попереду очисного вибою. Покрокове моделювання переміщення лави в просторовій комп'ютерній моделі шаруватого трансверсально-ізотропного масиву гірських порід дозволяє встановити закономірності формування напруженого стану навколо очисного вибою залежно від положення лави вздовж виймального стовпа. Встановлені залежності дозволяють оцінити НДС привибійної частини вугільного пласта, що відпрацьовується.

Ключові слова: *масив, напружений стан, моделювання, очисна виробка.*

The results of the stress researching in the longwall, that were obtained applying three-dimensional incremental computer model of the stratified transversely isotropic rock mass, are presented in the article. The stress curve along a longwall depending on stope attitude along an extraction pillar allows to assess the coal seam's stress and strain state ahead a stope. Parameters and results of the three-dimensional simulation of the rock mass are valid for Western Donbas conditions.

Key words: *massif, the stress state, modeling, mine workings.*

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Бондаренком 25.02.10