

Я.М. Наливайко, О.А. Акимов, А.П. Дяченко, А.В. Павличенко

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СВИТ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Разработан алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния горного массива при отработке свиты сближенных угольных пластов в условиях Львовско-Волинского бассейна. Установлены границы зон повышенного горного давления в кровле и почве вынимаемого пласта. Обоснованы параметры ведения очистных работ в зонах повышенного горного давления.

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОРОДНОГО МАСИВУ ПРИ РОЗРОБЦІ СВИТ ПОЛОГИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

Розроблено алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану гірського масиву при відпрацюванні світи зближених вугільних пластів в умовах Львівсько-Волинського басейну. Встановлено межі зон підвищеного гірського тиску в покрівлі та підшви пласта, що виймається. Обґрунтовано параметри ведення очисних робіт у зонах підвищеного гірського тиску.

ALGORITHM OF ROCK MASSIF STRESS-STRAIN STATE CALCULATION WHEN MINING A SUITE OF FLAT COAL SEAMS

Algorithm of rock massif stress-strain state calculation is developed when mining a suite of adjacent coal seams under conditions of Lviv-Volyn basin. The boundaries of increased rock pressure zones in the roof and bottom of the seam being mined are established. Stopping parameters in increased rock pressure zones are substantiated.

ВВЕДЕНИЕ

Львовско-Волинский бассейн, к которому относятся шахты ГП «Львовуголь», характеризуется специфическими особенностями геологического строения, связанными с его образованием и историей геологического развития. Разрабатываемая свита включает пласты n_7^H , n_7 , n_7^E , n_8 , n_8^E и n_9 . Мощности этих пластов изменяются в пределах 0,6 – 1,8 м, мощности междупластий – от 7 до 28 м. Верхний пласт n_8^E является од-

ним из основных промышленных пластов и интенсивно разрабатывается почти всеми Великомоствовскими шахтами Червоноградского геолого-промышленного района. Этот пласт, как и пласт n_7^H , отработан на значительных площадях. В настоящее время очистные работы ведутся в основном по пластам n_7^H , n_7^E , n_8 и n_8^E на глубине $H=360$ – 560 м. Углевмещающие породы – песчаники, аргиллиты и алевролиты [1].

На полях шахт Червоноградского геолого-промышленного района почти повсе-

местно основную кровлю рабочих угольных пластов слагают песчаники. В северной части района песчаники устойчивы и имеют пределы прочности на сжатие 70 – 100 МПа. В кровле пластов n_8 и n_8^6 они довольно устойчивые, а в почве пластов n_8^6 и n_7^H нередко залегают песчаники – «кучерявчики» с прочностью 30 – 50 МПа.

В настоящее время на шахтах Львовского региона принята панельная схема подготовки. Запасы отрабатываются длинными столбами обратным ходом с использованием механизированных комплексов КМК97М, КМ98, КМ87 и КМ88.

Наибольшие запасы сосредоточены в пластах n_9 , n_8^6 и n_7^6 . Специфика их разработки заключается в неоднократной подработке и надработке, в наличии краевых частей и целиков смежных пластов, создающих значительную концентрацию напряжений. При этом большинство лав работает в зонах повышенного горного давления (ПГД), а именно 81% лав в зонах влияния целиков и краевых частей, из них 56,4% – в зонах ПГД от целиков, оставляемых по двум-трем пластам одновременно. Это приводит к тому, что среднеустойчивая кровля переходит в разряд неустойчивой, наблюдаются частые вывалы пород, используемые механизированные комплексы оказываются неработоспособными.

Для обеспечения эффективной работы лав в зонах ПГД необходимо установить адекватные значения силовых и геометрических параметров механизированной крепи, а также определить наиболее рациональную скорость подвигания очистного забоя в конкретных горно-геологических условиях. Все это требует проведения тщательного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) слоистого неоднородного массива вокруг очистной выработки с учетом подработки и надработки и наличия в исследуемой области целиков и краевых частей сближенных угольных пластов. При этом необходимо не только установить картину НДС в исследуемой области массива, но и выполнить его анализ с помощью того или иного критерия прочности

пород. Чаще всего считается, что действующие максимальные напряжения не должны превышать пределов прочности пород на сжатие или растяжение.

Расчетные алгоритмы, создаваемые для определения напряжений и перемещений в вышеупомянутых областях, должны учитывать структуру и геометрические размеры исследуемой области массива, включая несущие элементы и зоны надработанных и (или) подработанных пород, физико-механические характеристики угля и междупластьев, глубину разработки, фактор времени и скорость подвигания очистного забоя [2 – 6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель работы заключается в создании алгоритма расчета НДС породного массива при разработке сближенных угольных пластов в условиях Львовско-Волынского бассейна.

Для достижения поставленной цели были выполнены теоретические, прикладные и экспериментальные исследования НДС неоднородного слоистого массива применительно к разработке свиты сближенных угольных пластов в сложных горно-геологических условиях.

Теоретические исследования включали анализ горно-геологических и горнотехнических условий, анализ существующих подходов к решению родственных задач, выбор метода определения и критерия оценки НДС исследуемой области массива, обоснование расчетных схем.

Величины и характер распределения напряжений и перемещений в породном массиве при выемке свиты пластов зависят от целого ряда факторов, основными из которых являются мощность угольных пластов и междупластьев, физико-механические свойства угля и вмещающих пород, глубина разработки, наличие в исследуемой области надработанных, подработанных пород, целиков и краевых частей пластов. Все эти факторы должны быть уч-

тены в алгоритме определения коэффициентов концентрации напряжений, а значит, по возможности, должны найти отражение в расчетных схемах. Две расчетные схемы, типичные для условий шахт ГП «Львов-уголь», изображены на рис. 1. Они включают пласты n_7^H , n_7^e и n_8 .

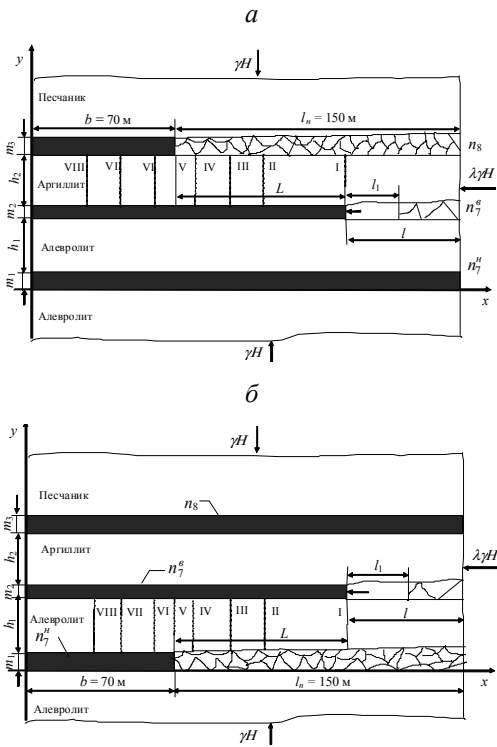


Рис. 1. Расчетные схемы при движении лавы на крайнюю часть смежного пласта: работа по пласту n_7^e в условиях надработки (а) и подработки (б)

Очистные работы ведутся по пласту n_7^e мощностью $m = 0,6 - 0,7$ м на глубине $H = 520$ м. Мощности m_1 и m_3 пластов n_7^H и n_8 соответственно равны $1,3 - 1,6$ и $1,4 - 1,6$ м, а мощности междупластий h_1 и h_2 изменяются в пределах $12 - 16$ и $9 - 12$ м. Данные схемы позволяют исследовать состояние почвы и кровли пласта n_7^e при подходе очистных работ к крайней части вышерасположенного пласта n_8 (условия надработки, рис. 1, а) и нижерасположен-

ного n_7^H (условия подработки, рис. 1, б).

Расчеты выполняли при различных значениях расстояния от очистного забоя по разрабатываемому пласту n_7^e до краевой части вышерасположенного пласта n_8 или до краевой части нижерасположенного пласта n_7^H (положения I – VIII на рис. 1, а и б).

Для выяснения наиболее рационального направления ведения очистных работ, кроме случаев подходов лав к крайним частям смежных пластов и работы в зонах этих крайних частей, рассматривались еще и случаи выхода лав из-под крайних частей смежных пластов (рис. 2, а и б, положения забоя I – VI).

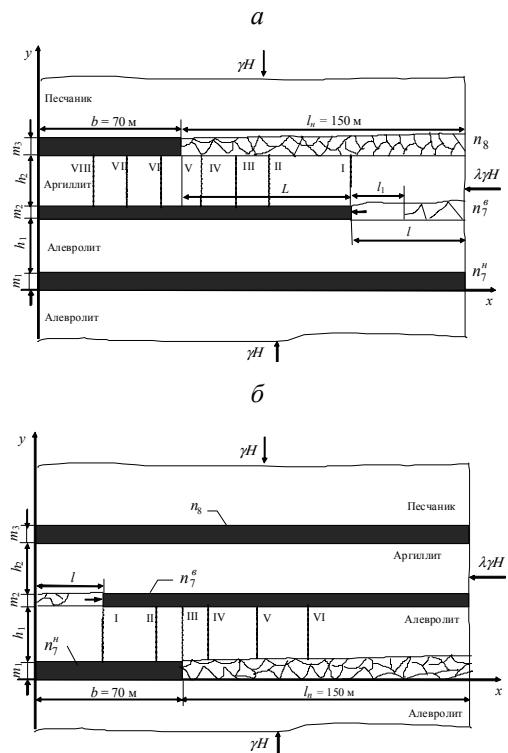


Рис. 2. Расчетные схемы при выходе лавы из зоны крайней части смежного пласта: работа по пласту n_7^e в условиях надработки (а) и подработки (б)

Расчетные схемы, изображенные на рис. 3, предназначены для оценки влияния целика на НДС кровли и почвы разрабатыва-

ваемого пласта в случаях, когда целик находится над пластом (рис. 3, а) и под пластом (рис. 3, б).

НДС исследуемой области массива анализируется при различных взаимных расстояниях очистного забоя и целика: на подходе забоя к границе целика (положение I), линия забоя совпадает с границей целика (положение II), линия забоя совпадает со средним сечением целика (положение III),

$$\sigma_{экс} = \frac{(1-\psi)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1-\psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1^2 + \sigma_3^2)}}{2} \leq [\sigma], \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – наибольшее и наименьшее главные напряжения, МПа;

$\psi = \sigma_p / \sigma_c$; σ_p и σ_c – пределы прочности породы на растяжение и сжатие, МПа;

$[\sigma]$ – допустимое напряжение, равное $\bar{\sigma}_p / \kappa_3$ в зонах растяжения и $\bar{\sigma}_c / \kappa_3$ в зонах сжатия ($\bar{\sigma}_p$ и $\bar{\sigma}_c$ – средние значения пределов прочности пород на растяжение и сжатие, а κ_3 – коэффициент запаса прочности).

В частности, по критерию (1) устанавливаются границы области предельного напряженного состояния над лавой. Весом пород в этой области создается нагрузка P_0 на механизированную крепь в лаве. К ней необходимо прибавить дополнительную нагрузку $q(V)$, равную $0,03P(V)$, определяемую с учетом фактора времени.

Задача определения НДС исследуемой области массива решается методом граничных элементов в той его модификации, которую принято называть методом фиктивных нагрузок. Базовым является аналитическое решение известной задачи Кельвина о действии нормальных и тангенциальных сил, равномерно распределенных на отрезке, произвольно ориентированном в бесконечной упругой среде. Основными этапами расчета являются:

забой под второй границей целика (положение IV) и забой за целиком (положение V).

Действующая нагрузка в расчетных схемах – вес пород: в вертикальном направлении на бесконечности – γH , а в горизонтальном – $\lambda \gamma H$. Оценка устойчивости кровли и почвы разрабатываемых пластов выполняется по критерию П.П. Баландина [7], который имеет вид

– аппроксимация границ исследуемой области конечными элементами и введение в каждую из них фиктивных нормальных P_n и тангенциальных P_s сил;

– задание граничных условий в элементах свободных контуров и условий совместности деформаций в элементах смежных контуров «кровля – целики» и «целики – почва»;

– получение с помощью базового решения аналитических соотношений для напряжений и перемещений в каждом из граничных (в т.ч. смежных) элементов, выраженных через неизвестные фиктивные силы P_n и P_s ;

– вычисление по полученным соотношениям коэффициентов влияния напряжений и перемещений;

– формирование системы уравнений для определения сил P_n и P_s в соответствии с заданными граничными условиями и условиями совместности деформаций;

– решение полученной системы алгебраических уравнений (в разработанном алгоритме используется метод Гаусса), вычисление сил P_n и P_s , обеспечивающих выполнение заданных граничных условий и условий совместности деформаций;

– вычисление напряжений и смещений в исследуемой области от найденных сил и заданной нагрузки, которые вместе обеспечивают выполнение заданных условий.

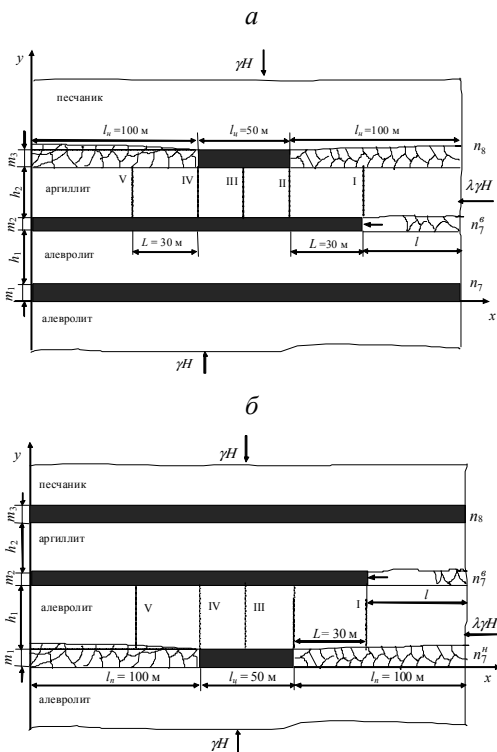


Рис. 3. К оценке влияния целика: а – целик над очистным забоем; б – целик под очистным забоем

Соотношение для перемещений в направлении нормали к i -му граничному элементу u_n^i и в направлении касательной

к нему u_s^i записываются в виде

$$\left. \begin{aligned} u_n^i &= \sum_{j=1}^N B_{ns}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N B_{nn}^{ij} P_n^j \\ u_s^i &= \sum_{j=1}^N B_{ss}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N B_{sn}^{ij} P_n^j \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Соотношения для соответствующих напряжений i -го элемента имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n^i &= \sum_{j=1}^N A_{ns}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} P_n^j \\ \sigma_s^i &= \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^{ij} P_n^j \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В соотношениях (2) и (3) N – количество граничных элементов; B_{ss}^{ij} , B_{sn}^{ij} , B_{ns}^{ij} , B_{nn}^{ij} – коэффициенты влияния перемещений; A_{ss}^{ij} , A_{sn}^{ij} , A_{ns}^{ij} , A_{nn}^{ij} – коэффициенты влияния напряжений.

Собственные коэффициенты влияния, характеризующие вклад «фиктивных» нагрузок P_n^i и P_s^i i -го элемента на смещения и напряжения самого i -го элемента, при $\bar{x} = \bar{y} = \gamma = 0$ имеют вид

$$\begin{aligned} B_{sn}^{ii} &= B_{ns}^{ii} = 0; & B_{ss}^{ii} &= B_{nn}^{ii} = -\frac{3-4\nu}{4\pi G(1-\nu)} a^i \ln a^i; \\ A_{sn}^{ii} &= A_{ns}^{ii} = 0; & A_{ss}^{ii} &= A_{nn}^{ii} = \frac{1}{2}; \\ A_{ts}^{ii} &= A_{nt}^{ii} = 0; & A_{tt}^{ii} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\nu}{1-\nu}. \end{aligned} \quad (4)$$

Компоненты «фиктивных» нагрузок P_n^i и P_s^i выполнены на примере расчетной схемы, изображенной на рис. 1, б. Она включает шесть областей (рис. 4): C_1 – породный массив в почве пласта n_7^H ; C_2 – краевая часть угольного пласта n_7^H ; C_3 –

работанная область, заполненная обрушенными породами; C_4 – междупластье; C_5 – угольный пласт n_7^e ; C_6 – кровля пласта n_7^e . Границы областей C_κ ($\kappa = \overline{1,6}$) аппроксимируются соответственно N_κ элементами. В нашем случае $N_1=44$, $N_2=29$, $N_3=61$, $N_4=154$, $N_5=131$, $N_6=110$. Тогда

$N = \sum_k N_k = 529$. Номера элементов и направления обхода границ областей для рассматриваемой схемы указаны на рис. 4. Смежные контуры на этом рисунке условно раздвинуты.

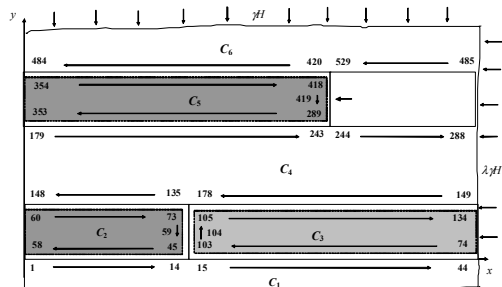


Рис. 4. Конечно-элементная аппроксимация границ

В общем виде исходная система алгебраических уравнений с $2N$ неизвестными компонентами «фиктивных» нагрузок, которая представляет собой заданные граничные условия на свободных контурах исследуемых областей и условия совместности деформаций – на смежных, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^N C_{ss}^{i,j} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{sn}^{i,j} P_n^j &= b_s^i \\ \sum_{j=1}^N C_{ns}^{i,j} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{nn}^{i,j} P_n^j &= b_n^i \end{aligned} \right\}_{i=1,2,\dots,N} \quad (5)$$

Решая систему $2N$ линейных алгебраических уравнений, находим силы P_n^i и P_s^i , а затем, согласно принципу суперпозиции, – смещения и напряжения в любой точке исследуемой области массива.

Степень влияния надрботки и подработки на НДС массива при выемке свиты пологих угольных пластов в условиях шахт ГП «Львовуголь» оценивалась по величинам максимальных коэффициентов концентрации K_y в кровле и почве разрабатываемого пласта в зонах влияния целиков и краевых частей сближенных пластов.

Расчеты производились по схемам, изо-

браженным на рис. 1 – 3 при следующих исходных данных: мощности m_1 , m_2 и m_3 пластов n_7^H , n_7^6 и n_8 составляют соответственно 1,45; 0,65 и 1,5 м; глубина залегания разрабатываемого пласта n_7^6 $H = 520$ м; мощности междупластьев $h_1 = 16$ м и $h_2 = 13$ м.

В расчетных схемах рис. 1 а, б и 2 а, б размер краевой части пласта над (или под) очистным забоем по пласту n_7^6 $b = 70$ м; зоны надрботки и подработки имеют одинаковые размеры $l_H = l_n = 150$ м. Длина выработанного пространства позади очистного забоя l по пласту n_7^6 принимала в расчетах значения 50, 100, 120, 140 и 150 м.

Расстояние L от очистного забоя до краевых частей смежных пластов при этом составляло 100, 50, 30, 10 и 0 м (забой под границей краевой части), -10 , -30 и -50 м (забой под краевой частью пласта). Часть выработанного пространства $(l - l_1)$ заполнялась разрушенными породами. Параметр l_1 представляет собой шаг обрушения непосредственной кровли, определяемый из условия

$$(\Delta u_y)_{max} \leq [\Delta u_y], \quad (6)$$

где $(\Delta u_y)_{max}$ – максимальное сближение почвы и кровли очистной выработки, позади лавы, полученное расчетом;

$[\Delta u_y]$ – допустимое значение Δu_y , назначаемое исходя из результатов шахтных наблюдений с учетом технических возможностей используемой механизированной крепи (возникающие в лаве смещения пород почвы и кровли не должны препятствовать нормальной работе очистного оборудования).

Модуль упругости $E_p = 10$ МПа и коэффициент Пуассона $\nu_p = 0,499$ для разрушенных пород в области $(l - l_1)$.

При расчетах по схемам рис. 3, а и б рассматривались пять различных положений линии очистного забоя по отношению к границам выше- и нижерасположенного целика: на подходе к нему ($L = 30$ м, поло-

жение I), непосредственно под (над) границей ($L=0$, положение II), под (над) средним сечением целика ($L=25$ м, положение III), под (над) второй границей ($L=0$, положение IV) и позади целика ($L=30$ м, положение V).

Ширина целика l_c равнялась в расчетах 50 м, а размеры зон надработки l_n и подработки l_p по обе стороны от целика составляли 100 м.

Выполнение серии расчетов для различных положений забоя по пласту n_7^6 позволило проследить за изменением картины НДС в исследуемой области массива по мере подвигания фронта очистных работ и установить границы зон ПГД, необходимые для обоснования параметров ведения очистных работ в рассматриваемых горно-геологических условиях.

Типичные эпюры нормальных напряжений σ_y и вертикальных смещений u_y в почве и кровле разрабатываемого пласта n_7^6 построены по результатам одного из вариантов расчетов по схеме рис. 1, а в случае $L=50$ м на подходе к краевой части (условия надработки) – изображены на рис. 5, а и б.

Анализ данных этого расчетного варианта показал, что зона повышенного горного давления (превышающего уровень \mathcal{H}) в кровле вынимаемого пласта n_7^6 в горизонтальном направлении впереди очистного забоя простирается на 12 м. В вертикальном направлении она имеет протяженность 3,5 м в кровле и 5 м в почве. Породы кровли позади очистного забоя на участке l_1 находятся в предельном напряженном состоянии (нарушается условие прочности по критерию (1)).

В зоне повышенного горного давления впереди лавы максимум давления (напряжения σ_{yy}) приходится на сечение, расположенное на расстоянии $a=1$ м по оси O_x от забоя, а в зоне повышенного горного давления позади лавы – на сечение, удаленное на 3 м по оси O_x от забоя.

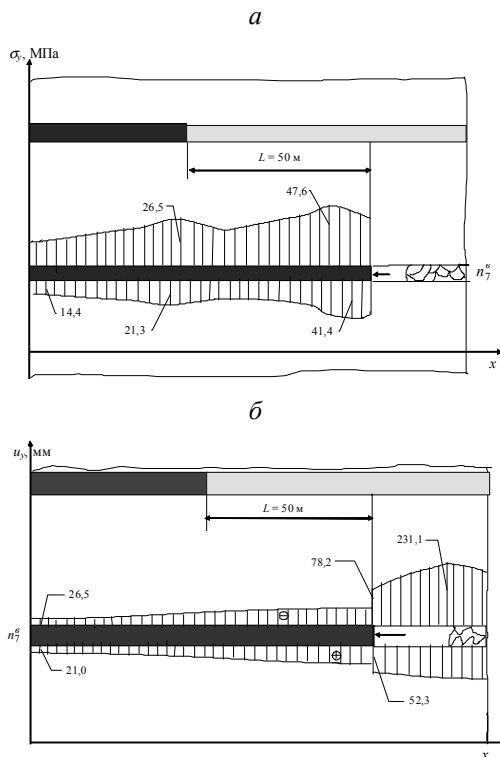


Рис. 5. Эпюры нормальных напряжений и вертикальных смещений в кровле и почве пласта n_7^6 (условия надработки)

Нагрузка P_0 на секцию механизированной крепи, создающаяся весом пород зоны предельного напряженного состояния на длине l_1 , составляет 114,7 кН/м.

При подработке, когда забой находится на расстоянии $L=50$ м от края нижележащего пласта на подходе к этому краю, протяженность зоны повышенного горного давления составляет 14 м по оси O_x и распространяется вдоль оси O_y на 5 м в кровле (составляет 31,2% от h_2) и на 5,5 м в почве (составляет 40,6% от h_1). Нагрузка P_0 на секцию механизированной крепи в этом случае равна 127,8 кН/м.

Данные всех вариантов расчетов по оценке влияния краевых частей сближенных пластов на НДС кровли и почвы разрабатываемого пласта n_7^6 в условиях над-

работки и подработки приведены в табл. 1 и 2. Это максимальные значения коэффициента концентрации напряжений $(K_y)_{max}$ в зоне опорного давления впереди очистного забоя, максимальные сближения кровли и почвы в лаве и величины нагрузки P_0 , которая действует на секцию механизированной крепи от веса пород, находящихся

в зоне предельного напряженного состояния над лавой.

В табл. 1 содержатся данные, относящиеся к случаю движения лавы по направлению к краевым частям, а в табл. 2 – к случаю выхода очистного забоя из-под краевых частей.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НДС КРОВЛИ И ПОЧВЫ ВЫНИМАЕМОГО ПЛАСТА n_7^g ПОД (НАД) КРАЕВЫМИ ЧАСТЯМИ СБЛИЖЕННЫХ ПЛАСТОВ (ПРИ ДВИЖЕНИИ ЛАВЫ НА КРАЕВЫЕ ЧАСТИ)

Таблица 1

Положение очистного забоя	Расстояние от забоя до границ краевой части, L , м		Коэффициент концентрации напряжений впереди забоя, $(K_y)_{max}$	Конвергенция в лаве, $(u_y)_{max}$, мм	Нагрузка на секцию механизированной крепи, P_0 , кН/м
	I	II			
на подходе к краевой части	I	100	2,65 / 2,72	173,1 / 167,3	76,1 / 80,4
	II	50	3,40 / 3,26	231,5 / 253,3	114,7 / 127,8
	III	30	3,51 / 3,67	285,4 / 240,1	115,6 / 135,4
	IV	10	3,59 / 3,85	251,3 / 248,8	123,6 / 141,0
	V	0	3,86 / 4,13	238,0 / 248,2	126,7 / 137,2
под (над) краевой частью	VI	-10	4,23 / 4,33	237,0 / 245,5	137,7 / 111,4
	VII	-30	4,35 / 4,35	246,6 / 240,9	135,0 / 81,3
	VIII	-50	4,33 / 4,34	244,7 / 247,0	126,0 / 76,1

Примечание: в числителе – в условиях наработки, в знаменателе – в условиях подработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НДС КРОВЛИ И ПОЧВЫ ВЫНИМАЕМОГО ПЛАСТА n_7^g ПОД (НАД) КРАЕВЫМИ ЧАСТЯМИ СБЛИЖЕННЫХ ПЛАСТОВ (ПРИ ВЫХОДЕ ЛАВЫ ИЗ-ПОД КРАЕВЫХ ЧАСТЕЙ)

Таблица 2

Положение очистного забоя	Расстояние от забоя до границ краевой части, L , м		Коэффициент концентрации напряжений впереди забоя, $(K_y)_{max}$	Конвергенция в лаве, $(u_y)_{max}$, мм	Нагрузка на секцию механизированной крепи, P_0 , кН/м
	I	II			
под (над) краевой частью	I	30	2,35 / 2,35	120,0 / 120,1	85,5 / 84,1
	II	10	2,96 / 2,98	159,0 / 159,8	106,2 / 108,1
	III	0	3,56 / 3,60	197,9 / 199,8	136,3 / 103,2
при выходе из-под краевой части	IV	-10	3,55 / 3,55	212,1 / 207,8	150,0 / 182,0
	V	-30	3,70 / 3,69	244,6 / 229,1	169,2 / 215,7
	VI	-50	3,57 / 3,63	242,6 / 231,3	167,5 / 222,3

Примечание: в числителе – в условиях наработки, в знаменателе – в условиях подработки.

Анализ полученных результатов показал, что при движении в направлении к краевой части в условиях наработки максимальный коэффициент концентрации на-

пряжений $(K_y)_{max}$, равный 4,35, возникает на расстоянии $L = -30$ м (положение VII, рис. 1 а и б). При этом нагрузка на механизированную крепь P_0 составляет 135 кН/м.

С другой стороны в положении VI ($L = -10$ м) максимум имеет нагрузка на крепь $P_0 = 137,7$ кН/м, а коэффициент концентрации напряжений $(K_y)_{max}$ при этом составляет 4,23, т.е. меньше, чем в первом случае.

Качественно такая же картина наблюдается и в случае подработки с той лишь разницей, что сами величины коэффициентов концентрации напряжений $(K_y)_{max}$ и нагрузок P_0 на крепь при подработке несколько больше. Наиболее опасными являются в этом случае положения IV и VI. Поэтому при определении рациональных силовых параметров механизированной крепи необходимо рассмотреть все эти положения и выбрать наиболее опасные. В табл. 1 соответствующие значения выделе-

ны жирным шрифтом.

При движении лавы в противоположном направлении для крепи создаются наиболее неблагоприятные условия, причем, как и в предыдущих случаях, самые большие коэффициенты концентрации и нагрузки на механизированную крепь возникают в условиях подработки (положения VI и V на рис. 2, а и б), в табл. 2 они выделены жирным шрифтом. Именно на эти положения следует обратить внимание при определении рациональных параметров механизированной крепи, работающей в зонах влияния краевых частей смежных пластов.

Результаты анализа НДС кровли и почвы обрабатываемого пласта n_7^6 под (над) целиками приведены в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НДС КРОВЛИ И ПОЧВЫ ВЫИМАЕМОГО ПЛАСТА n_7^6
ПОД (НАД) ЦЕЛИКАМИ

Таблица 3

Положение очистного забоя	Расстояние от забоя до границ краевой части, L , м		Коэффициент концентрации напряжений впереди забоя, $(K_y)_{max}$	Конвергенция в лаве, $(u_y)_{max}$, мм	Нагрузка на секцию механизированной крепи, P_0 , кН/м
	I	II			
на подходе к целику	I	30	2,81 / 2,88	195,9 / 190,2	72,4 / 108,6
	II	0	3,04 / 3,26	196,7 / 203,1	99,7 / 136,1
под (над) целиком	III	25	3,88 / 3,90	222,1 / 223,9	108,6 / 144,8
за целиком	IV	0	4,35 / 4,34	277,2 / 268,5	106,4 / 142,0
	V	30	4,40 / 4,44	314,1 / 295,6	90,3 / 126,4

Примечание: в числителе – в условиях наработки, в знаменателе – в условиях подработки.

Как видно из табл. 3, наиболее неблагоприятными для механизированной крепи являются положения III ($L = 25$ м) и IV ($L = 0$ м).

Результаты расчетов показали, что в условиях надработки в этих случаях протяженность зоны ПГД в горизонтальном направлении (по оси O_x) впереди очистного забоя составляет 25 м. Вверх в вертикальном направлении (по оси O_y) в кровле она простирается на 5,5 м, а вниз в почве на 3 м.

В предельном напряженном состоянии по критерию (1) находятся породы кровли впереди очистного забоя в области с размерами 2 – 4 м по оси O_x и 1,5 – 2 м по оси O_y .

На расстоянии $L = 25$ м весом разрушенных пород над лавой создается нагрузка на секцию механизированной крепи $P_0 = 168,4$ кН/м, а при $L = 0$ м $P_0 = 165$ кН/м.

При подработке (лава над целиком) установлена такая картина. Длина зоны повышенного горного давления (размер по оси O_x) впереди очистного забоя составляет 35 м. В вертикальном направлении (по оси O_y) в кровле протяженность ее 6 м, а в почве 3 м. Нагрузка на секцию механизированной крепи при $L = 25$ м составляет 224,5 кН/м, а при $L = 0$ $P_0 = 220,4$ кН/м.

Расстояние a от очистного забоя в глубину массива до сечения, в котором воз-

никает максимальная концентрация напряжений σ_{yy} , т.е. протяженность зоны отжима краевой части угольного пласта, как и при работе лавы в окрестности краевых частей смежных пластов, во всех рассмотренных случаях близко к 1 м.

Таким образом, получены все необходимые величины для расчета рациональных силовых параметров механизированной крепи при работе ее в зонах повышенного и пониженного горного давления, а также для определения скорости подвигания лавы и допустимого расстояния между очистными забоями сближенных пластов.

Важнейшими условиями безопасной работы угольных шахт является обеспечение рабочего состояния всей сети горных выработок от поверхности до очистных забоев с минимальными затратами на их проведение и поддержание. Актуальность обеспечения эксплуатационной устойчивости подготовительных выработок в условиях разработки сближенных пластов постоянно возрастает в связи с увеличением глубины ведения горных работ. При этом на характере распределения горного давления существенно сказываются надработка или подработка. Поэтому при выборе способа охраны и крепления выработок, особенно в случае слабых вмещающих пород, необходимо исходить из анализа НДС массива с учетом конкретных горнотехнических ситуаций и горно-геологических условий.

Типичной для шахт Львовско-Волынского бассейна является слоистая неоднородная среда, в которой напряженное состояние кровли и почвы сближенных пластов претерпевает существенные изменения под воздействием горных работ. Для получения количественных оценок в отношении влияния мощности междупластьев и глубины разработки расчеты выполнялись для ряда определяющих параметров.

Анализ полученных данных показал, что с уменьшением мощности междупластья степень роста напряжений в зоне опорного давления обрабатываемого пласта увеличивается. Так, максимальный ко-

эффициент концентрации напряжений σ_y в кровле пласта в сечении $x = 29$ м по отношению к уровню γH составляет $k_y = 1,51$ при $h_2 = 6$ м и $k_y = 1,46$ при $h_2 = 20$ м.

В меньшей мере на коэффициенте концентрации k_y сказывается глубина разработки H : и при $H = 300$ м и при $H = 600$ м в сечении $x = 29$ м в кровле обрабатываемого пласта k_y имеет одно и то же значение.

В своде подготовительной выработки на глубине $H = 300$ м при $h_2 = 6$ м коэффициент концентрации эквивалентного напряжения, подсчитанный по критерию П.П. Баландина, достигает значения 2,1 и остается таким же на глубине $H = 600$ м. Абсолютное же значение максимального эквивалентного напряжения при глубине $H = 500$ м становится равным пределу прочности породы на сжатие, а при $H = 600$ м уже в 1,2 раза превосходит его.

Рост напряжений в массиве, окружающей выработку, приводит к увеличению смещений на ее контуре. Выполненные исследования показали, что при увеличении глубины разработки с 300 до 600 м максимальные вертикальные смещения u_y в своде возрастают в 1,79 раза. Неучет подобных изменений НДС вокруг подготовительных выработок, попадающих под влияние очистных работ по смежным пластам, при выборе крепи является одной из причин деформирования подготовительных выработок.

ВЫВОДЫ

1. На основе метода граничных элементов разработан эффективный расчетный алгоритм для определения НДС неоднородного массива применительно к разработке свиты пологих сближенных угольных пластов. В отличие от известных, разработанный алгоритм учитывает наличие в исследуемой области целиков и краевых частей угольных пластов в условиях как надработки, так и подработки.

2. С помощью разработанного алгоритма для условий шахт ГП «Львовуголь» ус-

тановлены границы зон повышенного горного давления в кровле и почве вынимаемого пласта, определены величины максимальных коэффициентов концентрации напряжений σ_y по отношению к уровню \mathcal{H} и найдена нагрузка, действующая на секцию механизированной крепи от веса пород, находящихся в области предельного напряженного состояния в кровле над лавой.

3. Установлено, что в условиях шахт ГП «Львовуголь» при работе очистных забоев в зонах влияния краевых частей смежных пластов наиболее опасным, с точки зрения проявлений горного давления, является период выхода лавы из-под краевой части нижерасположенного пласта. В частности, механизированная крепь оказывается максимально нагруженной, когда забой находится на расстоянии 5 – 10 м от краевой части. Поэтому рациональные силовые параметры механизированной крепи должны опре-

деляться по характеристикам НДС именно этой области массива.

4. Установлено, что при ширине целиков до 50 м, оставляемых на смежных пластах, наиболее опасным для механизированной крепи является режим ее работы в условиях подработки, когда лава находится над средним сечением целика и на подходе к краю целика (на расстоянии $L=25$ м). Данные положения являются определяющими при расчете силовых параметров используемой механизированной крепи.

5. Установлено, что при увеличении глубины разработки с 300 до 600 м максимальные смещения u_y в своде подготовительной выработки в условиях подработки возрастают в 1,79 раза. Данный результат необходимо учитывать при выборе типа поддерживающей крепи.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Львовско-Волинский каменноугольный бассейн (геологический очерк) / Струев М.И. и др. – К.: Наукова думка, 1984. – 272 с.

2. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – М.: Мир, 1987. – 328 с.

3. Новикова Л.В. Напряженно-деформированное состояние массива при разработке свиты пластов / Л.В. Новикова, Л.И. Заславская, Я.М. Наливайко // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Д., 2001. – Вып. 25. – С. 85 – 88.

4. Колоколов О.В. Математическое моделирование геодинамических процессов при различной очередности отработки весьма сближенных пластов в условиях Западного Донбасса / О.В. Колоколов, Н.А. Лубенец // Науковий вісник НГАУ. – 2000. – №3. – С. 101 – 102.

5. Бугара М.И. Прогноз устойчивости непосредственной кровли в сложных горно-геологических условиях / М.И. Бугара, Ю.Б. Грядущий, В.В. Назимко // Уголь Украины. – 1997. – № 4. – С. 15 – 17.

6. Сдвигание горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений / А.Г. Акимов, В.Н. Земисев, Н.Н. Кацнельсон [и др.]. – М.: Недра, 1970. – 245 с.

7. Писаренко Т.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии / Т.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – К.: Наукова думка, 1969. – 108 с.

ОБ АВТОРАХ

Наливайко Ярослав Михайлович – к.т.н., генеральный директор ГП «Львовуголь».

Акимов Олег Анатольевич – технический директор – первый заместитель генерального директора ГП «Львовуголь».

Дяченко Андрей Павлович – заместитель генерального директора по производственным вопросам – директор дирекции по производству ГП «Львовуголь».

Павличенко Артем Владимирович – к.б.н., доцент кафедры экологии Национального горного университета.