

УДК 622.2 (075)

**АНАЛІЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМІРОВАНОГО СОСТОЯННЯ
МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ЛЕНТОЧНЫХ ЦЕЛИКОВ КАМЕРАМИ****Бузило В.И.,***Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,***Яворский В.Н.,***Днепропетровской территориальной организации профсоюза работников
угольной промышленности,***Яворский А.В.,***Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»*

С целью анализа напряженно-деформированного состояния системы «кровля – целики – почва» разработан расчетный алгоритм, в основу которого положен метод граничных элементов и аналитическое решение задачи Кельвина. Поставленная задача геомеханики решена в дополнительных напряжениях. Выполненный нелинейный множественный корреляционный анализ полученных результатов позволил установить уравнения регрессии для максимальных значений сближений кровли и почвы в процентах от мощности пласта.

Ключевые слова: геомеханика, «кровля – целики – почва», камера, нагрузка, массив, уравнение регрессии.

Введение. Энергетической стратегией Украины до 2030 года предусмотрено значительное увеличение доли угля в топливно-энергетическом балансе Украины. В связи с этим выемка тонких пластов и ленточных целиков мощностью 0,6...1,2 м, в которых на эксплуатируемых месторождениях сосредоточено до 70% запасов кондиционных углей, стала одной из важнейших проблем. Сложность ее решения на шахтах Западного Донбасса объясняется специфическими горно-геологическими условиями. Угли в этом регионе достаточно прочные (коэффициент крепости по М.М. Протодяконову $f = 2,0...3,5$), а вмещающие породы – аргиллиты, алевролиты и песчаники слабоустойчивы ($f = 0,8...2,5$). Поэтому применявшиеся в свое время бурошнековые машины в этих условиях оказались малоэффективными: режущие органы зачастую не справлялись с крепкими углями, а из-за слабой устойчивости пород между камерами приходилось оставлять широкие целики. Ситуация несколько улучшилась после перехода на установки БЗМ-1М с усовершенствованными режущими органами, но потери угля оставались значительными.

Актуальность работы. Более рациональной в этих условиях может быть выемка угля ряда или блока камер с оставлением междукамерных целиков относительно малой ширины и достаточно широких опорных \square между блоками. В целях снижения потерь целесообразно междукамерные целики уменьшить до минимума, допуская их раздавливание после выемки блока. При этом можно воспользоваться и более эффективной техникой, например, угольным нарезным комбайном «Днепр», но при условии поддержания кровли камеры индивидуальной крепью.

Во всех случаях для обоснования параметров принятых систем разработки необходимы тщательные исследования геомеханических процессов, происходящих в массиве пород вокруг блока камер и целиков угля.

Целью статьи является анализ напряженно-деформированного состояния системы «кровля – целики – почва» при помощи разработанного расчетного алгоритма.

Состояние вопроса. Различные аспекты разрушения угольного пласта и слабых вмещающих пород в окрестности очистных выработок рассмотрены в работах О. В. Колоколова, А. Ф. Курносова, Н. А. Лубенца, А. Н. Зорина, В. Г. Колесникова и др. Вместе с тем в большинстве известных методик целики рассчитываются без учета фактора времени изолированно от кровли и почвы. Считается, что они нагружаются равномерно весом толщи пород до самой поверхности, что неверно в случае целиков различной ширины. Применяется также гипотеза сводообразования М. М. Протодьяконова (А. А. Борисов, Ф. П. Бублик, Г. Е. Гулевич, С. В. Ветров, П. П. Корж и др.), но для определения размеров свода обрушения требуются данные натуральных наблюдений.

Потолочина чаще всего рассчитывается по схеме балки, величина пролета которой зависит от ширины блока камер и угла обрушения пород кровли (Ю. А. Модестов, С. Г. Борисенко, Е. И. Камский, Ю. Б. Губенин и др.). Это опять-таки требует проведения если не шахтных, то лабораторных исследований.

Для рассматриваемых горно-геологических условий нельзя воспользоваться и аналитическими решениями плоских задач геомеханики о массивах, ослабленных бесконечным или конечным числом полостей различных очертаний, т.к. все они получены для однородных сред и в них не учитываются реологические свойства пород (Г. Н. Савин, Л. Д. Шевяков, Д. И. Шерман, А. С. Космодамианский, В. В. Рахимов, Л. И. Ильштейн и др.).

Многочисленные решения задач, выполненные известными численными методами конечных и граничных элементов, хотя и относятся к неоднородным средам, учитывают совместное деформирование кровли, целиков и почвы, в том числе и во времени, касаются конкретных технологических схем, конкретных горно-геологических условий (Ж. С. Ержанов, Т. Д. Каримбаев, Ю. М. Либерман, А. В. Усатенко, Л. В. Новикова, Е. А. Сдвижкова и др.) и также не могут быть использованы для обоснования параметров камерной системы в случае крепких углей и слабых пород.

И еще один очень важный аспект, который остался вне поля зрения исследователей, это вероятностная природа изменения физико-механических свойств неоднородного массива слабых пород. Данный фактор является определяющим не только при оценке напряженно-деформированного состояния самого массива горных пород, но и при решении вопросов,

связанных с оценкой надежности оборудования и технологии ведения очистных работ (К. Ф. Сапицкий, С. М. Липкович, Н. Н. Лебедев и др.).

Изложение основного материала. В данной работе для повышения надежности проектируемой камерной системы разработки учитывалась вероятностная природа физико-механических характеристик пород, обусловленная неоднородностью массива, и изменение их во времени.

Увеличение размеров междукамерных целиков резко повышает эксплуатационные потери полезного ископаемого. Это обуславливает необходимость либо внедрения систем разработки с закладкой выработанного пространства, либо совершенствования конструктивных схем и параметров камерной системы.

И в том и в другом случае необходим тщательный анализ напряженно-деформированного состояния системы «кровля – целики – почва».

Для этой цели авторы разработали расчетный алгоритм, в основе которого метод граничных элементов и аналитическое решение задачи Кельвина [1, 2]. Исходная система уравнений для определения напряжений и перемещений в исследуемой области массива в окрестности ряда выемочных камер и междукамерных целиков формируется в соответствии с заданными условиями на контурах выемочных камер. Расчет производится на действие сил веса пород. Используется модель линейной ползучести с ядром Абея. Поставленная задача геомеханики решается в дополнительных напряжениях. Полные напряжения полагаются равными сумме начальных, имевших место в массиве до начала разработки (в любой точке и на бесконечности в вертикальном направлении $(\sigma_{yy})_0^\infty = \gamma H$, а в горизонтальном $(\sigma_{xx})_0^\infty = \lambda \gamma H$; γ – объемная плотность породы, т/м³; $\lambda = \nu/(1-\nu)$ – коэффициент бокового отпора; ν – коэффициент Пуассона породы), и дополнительных, обусловленных образованием камер и междукамерных целиков. Поскольку на контурах камер полные напряжения равны нулю, на этих контурах становятся известными дополнительные напряжения, что и учитывается при составлении исходной системы уравнений.

Основными этапами расчета являются:

- аппроксимация границ исследуемой области конечными элементами и задания в каждом из них граничных условий;
- введение в каждом граничном элементе неизвестных фиктивных нормальных P_y и тангенциальных P_x равномерно распределенных нагрузок;
- выражение с помощью аналитического решения задачи Кельвина напряжений и перемещений в каждом граничном элементе через неизвестные «фиктивные» нагрузки P_x и P_y , вычисление коэффициентов влияния, формирование системы уравнений для определения P_x и P_y ;
- решение полученной системы алгебраических уравнений (в разработанном алгоритме используется метод Гаусса), вычисление нагрузок P_x и P_y , обеспечивающих вместе с реальной действующей нагрузкой от веса пород выполнение заданных граничных условий;

– вычисление напряжений и перемещений на границах и в любой внутренней точке исследуемой области с помощью найденных фиктивных нагрузок по методу суперпозиции.

Таким образом, исходная система уравнений формируется с помощью соотношений следующего вида:

– для перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях

$$\begin{aligned} u_y^i &= \sum_{j=1}^N B_{yx}^{ij} P_x^j + \sum_{j=1}^N B_{yy}^{ij} P_y^j, \\ u_x^i &= \sum_{j=1}^N B_{xx}^{ij} P_x^j + \sum_{j=1}^N B_{xy}^{ij} P_y^j; \end{aligned} \quad (1)$$

– для соответствующих напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_y^i &= \sum_{j=1}^N A_{yx}^{ij} P_x^j + \sum_{j=1}^N A_{yy}^{ij} P_y^j, \\ \sigma_x^i &= \sum_{j=1}^N A_{xx}^{ij} P_x^j + \sum_{j=1}^N A_{xy}^{ij} P_y^j. \end{aligned} \quad (2)$$

В соотношениях (1) и (2) N – количество граничных элементов; B_{yx}^{ij} , B_{yy}^{ij} , B_{xx}^{ij} , B_{xy}^{ij} – коэффициенты влияния перемещений; A_{yx}^{ij} , A_{yy}^{ij} , A_{xx}^{ij} , A_{xy}^{ij} – коэффициенты влияния напряжений.

Формулы для определения коэффициентов влияния, полученные с использованием упомянутого аналитического решения, приведены в монографии [3].

Исследуемая область породного массива включает три выемочные камеры, два опорных и два междукамерных целика. Рассматриваются горно-геологические условия шахт ПАО «ДТЭК Павлоградуголь». Отложения каменноугольной свиты представлены в этом месторождении аргиллитами и алевролитами, кое-где песчаниками и многочисленными пластами и пропластками каменного угля. Залегание пород и пласта пологое. Отложение покрывающих свит представлены песками, глинами и суглинками общей мощностью до 120 м. Угольные пласты различной мощности от 0,55 м до 1,28 м залегают на разных глубинах – от 90 м до 480 м. На разных шахтах кровля и почва пластов сложены перечисленными породами, предел прочности которых на сжатие $(\sigma_c)_n$ принимает значения, принадлежащие интервалу 8...40 МПа, а модуль упругости E_n – интервалу $0,1 \cdot 10^4 \dots 2,26 \cdot 10^4$ МПа. Средние значения объемной плотности и коэффициента Пуассона вмещающих пород составляют соответственно $\gamma_n = 2,65 \text{ т/м}^3$, $\nu_n = 0,3$.

Характеристики угля при коэффициенте вариации $V = 0,25$ имеют средние значения: $\gamma_y = 1,47 \text{ т/м}^3$, $E_y = 3,5 \cdot 10^3$ МПа, $(\sigma_c)_y = 35$ МПа, $\nu_y = 0,4$.

Ширина обрабатываемого столба определяется по формуле:

$$A = na + (n-1)b,$$

в которой b – ширина междукамерного целика, м; a – ширина камеры, м; n – количество камер в выделенном блоке.

Параметр A принимал в расчетах значения 4,8...8,7 м, а ширина опорного целика b_1 полагалась равной $2b$.

Таким образом, исходные данные к расчету – физико-механические E_y/E_n , $\gamma_n H/(\sigma_c)_y$ и геометрические a/b и b/m параметры имеют вероятностную природу. Поэтому расчет по разработанному алгоритму производился при различных значениях указанных величин:

$$E_y/E_n \in [0,15; 0,39; 1,25], \gamma_n H/(\sigma_c)_y \in [0,05; 0,11; 0,23; 0,36],$$

$$a/b \in [1,55; 1,75; 2,33; 3,50; 4,66],$$

$$b/m \in [0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,5; 1,6].$$

Высота камер и целиков равнялась мощности m вынимаемого пласта.

Модули упругости пород в соответствии с принятой моделью деформирования определялись через известную функцию ползучести с учетом того, что полный технологический цикл по отработке бурошнековой машиной одной камеры шириной 2,1 м и длиной 30 м составляет 6 часов. Согласно данным ВНИМИ [4] параметр ползучести α угля и пород полагался равным 0,7, а параметры δ аргиллита, алевролита, песчаника и угля соответственно имели значения:

$$1,17 \cdot 10^{-2} c^{-0,3}, 5,54 \cdot 10^{-3} c^{-0,3}, 3,28 \cdot 10^{-3} c^{-0,3}, 2,32 \cdot 10^{-3} c^{-0,3}.$$

Результаты исследований. Рассмотренные комбинации значений перечисленных параметров из возможных интервалов их изменений составили 180 расчетных вариантов.

Выполненный по известной методике [5] нелинейный множественный корреляционный анализ полученных результатов позволил установить уравнения регрессии для максимальных значений сближений кровли и почвы в процентах от мощности пласта:

$$\frac{\Delta u_y}{m} = -0,965 + 6,739 \frac{\gamma_n H}{(\sigma_c)_y} - \frac{E_y}{E_n} \left(1,044 - 0,640 \frac{a}{b} - 1,195 \frac{b}{m} \right), \quad (3)$$

а также для отношений максимальных растягивающих напряжений σ_{xx} в кровле к $\gamma_n H$:

$$\frac{(\sigma_{xx})_{кр}}{\gamma_n H} = 0,284 + 0,116 \frac{a}{b} + \frac{b}{m} \left(0,00874 \frac{E_y}{E_n} - 0,0934 \right). \quad (4)$$

Для междукамерных целиков получены соотношения

$$\frac{(\sigma_{yy})_{\max}}{\gamma_n H} = -3,555 + \frac{E_y}{E_n} \left(1,736 - 1,130 \frac{a}{b} \right) + 0,523 \frac{b}{m}. \quad (5)$$

$$\frac{(\sigma_{\text{экв}})_{\text{max}}}{\gamma_n H} = 1,344 + \frac{a}{b} \left(0,296 \frac{E_y}{E_n} + 0,591 \right) - 0,665 \frac{b}{m},$$

где $(\sigma_{yy})_{\text{max}}$ и $(\sigma_{\text{экв}})_{\text{max}}$ – нормальное σ_{yy} и эквивалентное $\sigma_{\text{экв}}$ напряжения в опасном сечении целика. Эквивалентные напряжения определялись по критерию П. П. Баландина:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{(1 - \psi)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1 - \psi)^2 (\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3)}}{2\psi},$$

где σ_1 и σ_3 – наибольшее и наименьшее главные напряжения; $\psi = \sigma_p / \sigma_c$; σ_p и σ_c – пределы прочности породы на растяжение и сжатие.

Для рассматриваемых пород $\psi = 0,1$.

Для опорных целиков установлена корреляционная зависимость вида

$$\frac{(\sigma_{yy})_{\text{max}}}{\gamma_n H} = -1,757 - \frac{a}{b} \left(0,436 \frac{E_y}{E_n} + 0,854 \right) + 0,509 \frac{b}{m}. \quad (6)$$

Выводы. Полученные корреляционные соотношения (3) – (6) предназначены для определения параметров проектируемых камерных систем разработки пологих угольных пластов в слабых породах. По ним, в частности, определялись рациональные параметры бурошнековой выемки угля в условиях шахт Западного Донбасса ($m = 0,8$ м; $H = 160$ м; $a = 2,1$ м; $b_1 = 1,2$ м; $b = 0,6$ м).

Промышленная проверка на шахтах ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» подтвердила их эффективность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд – М. : Мир, 1987. – 328 с.
2. Технология отработки угольных целиков камерами в условиях шахт Западного Донбасса [Текст] : моногр. / [В. И. Бузило, В. М. Яворский, А. Г. Кошка и др.] – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2011. – 95 с.
3. Метод граничных элементов в задачах горной геомеханики. / [Л. В. Новикова, П. И. Пономаренко, В. В. Приходько, И. Т. Морозов]. – Днепропетровск : Наука и образование, 1997. – 178 с.
4. Рекомендации по расчету смещений контура и нагрузок на крепь горных выработок по экспериментальным показателям деформирования пород за пределом прочности. – Л. : ВНИМИ, 1982. – 36 с.
5. Львовский Е. Н. Статистический метод построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский – М. : Высшая школа, 1982. – 223 с.

Бузило В.І., Яворський В.М., Яворський А.В. АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАСИВУ ПРИ ОБРОБЦІ ЛЕНТОЧНИХ ЦЕЛИКІВ КАМЕРАМИ

З метою аналізу напружено-деформованого стану системи «покрівля – цілики – ґрунт» розроблений розрахунковий алгоритм, в основу якого покладено метод граничних елементів і аналітичне рішення задачі Кельвіна. Поставлена задача геомеханіки вирішена в додаткових напруженнях. Виконаний нелінійний множинний кореляційний аналіз отриманих результатів дозволив встановити рівняння регресії для максимальних значень зближень покрівлі і ґрунту у відсотках від потужності пласта.

Ключові слова: геомеханіка, «покрівля – цілики – ґрунт», камера, навантаження, масив, рівняння регресії.

Buzlyo V.I., Yavorsky V.M., Yavorsky A.V. ANALYSIS OF STRAINED AND DEFORMED MASSIF'S STATE AT TRIMMING UP BAND PILLARS BY CHAMBERS

In order to analyze strained and deformed state of the «roof – pillars – ground» system the calculation algorithm was developed which is based on the boundary element method and analytical solution of Kelvin's task. This geomechanical problem is solved in the additional stresses. Non-linear multiple correlation analysis of results allowed to find out in percentage the regression equation for the maximum values of roof and ground closing in depending on the thickness of the seam.

Keywords: geomechanics, «roof –pillars– the ground», chamber, stress, massif, the regression equation.