

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.831

ОБОСНОВАНИЕ АКТИВНЫХ СПОСОБОВ ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ ПРИ ОТРАБОТКЕ МОЩНЫХ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ С ВЫПУСКОМ УГЛЯ

В. И. Клишин¹, Г. Ю. Опрук¹, Л. Д. Павлова², В. Н. Фрянов²

¹*Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,*

E-mail: klishinvi@icc.kemsc.ru, Ленинградский проспект, 10, 650065, г. Кемерово, Россия

²*Сибирский государственный индустриальный университет,*

E-mail: ld_pavlova@mail.ru, ул. Кирова, 42, 654007, г. Новокузнецк, Россия

На основе численного моделирования проведены комплексные исследования напряженно-деформированного состояния подкровельной толщи над секциями механизированной крепи, оснащенной средствами выпуска угля на забойный конвейер. Установлено, что пассивное управление предразрушением подкровельной толщи не обеспечивает ее дезинтеграцию и дозирование горной массы на забойный конвейер. Получены зависимости отношения остаточной и начальной прочности угля от распора секций механизированной крепи при различных сочетаниях способов и средств активного управления, обоснованы области их применения и режимы дозированного выпуска.

Угольный пласт, подкровельная толщина, напряжения, дозирование горной массы, предразрушение, численное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20200308

Повышение эффективности и безопасности технологии подземной отработки мощных угольных пластов — актуальная научно-практическая задача горной науки, так как применяемые традиционные системы слоевой разработки характеризуются потерями угля до 30 %, высоким риском возникновения эндогенных пожаров в очистном выработанном пространстве, разрушением межслоевой пачки при отработке нижнего слоя, необходимостью использования металлической рамной крепи для поддержания подготовительных выработок по нижнему слою [1].

Возможный вариант принятия инновационных решений в угольной промышленности — развитие технологии разработки мощных пластов одним подсечным слоем у почвы пласта с выпуском угля подкровельной толщи на забойный конвейер [2, 3]. Эффективность данного метода подтверждена на шахтах Китая, Австралии, Казахстана и в Кузбассе [1, 4]. Так, в Китае при отработке угольных пластов мощностью до 6.5 м достигнута средняя нагрузка на длинный очистной забой 1 млн т в год, а производительность труда возросла в 1.5–3.0 раза по сравнению с монослоевой или слоевой технологией выемки [1]. Опытно-промышленные испытания

на шахтах России для условий отработки пластов мощностью 6.25–14.75 м (в среднем 7 м) привели к следующим результатам: общая добыча угля из выемочного столба составила 2237.2 тыс. т, в том числе выемка комбайном в подсечном слое — 1045.3, а выпуск — 1191.9 тыс. т; потери угля по выемочному столбу не превышали 14–15 %, а на участке вывода комплекса из монтажной камеры могут достигать 50 % [4]. Засорение горной массы породой не превышало 9 %. Наиболее трудоемкими оказались процесс разрушения подкровельной толщи и подготовка горной массы к выпуску.

Один из способов увеличения эффективности выпуска угля подкровельной толщи при отработке мощных пластов — применение вибрации для разрыхления горной массы перед выпуском на конвейер. Такой подход обеспечивает повышение производительности очистного забоя и полноты извлечения запасов угля [5].

Для научных исследований эффективны методы физического, математического и численного моделирования процессов взаимодействия массива горных пород и очистного механизированного забоя при слоевой отработке мощного пласта с выпуском подкровельной толщи. На основе сравнительного анализа в [6, 7] отмечено, что использование методов физического и численного моделирования гарантирует выбор параметров крепи, оценку производительности очистного забоя и коэффициента извлечения запасов угля при различных горно-геологических условиях, в том числе при слоевой отработке мощных пластов с выпуском подкровельной толщи в подсечной слой, оснащенный механизированным комплексом.

По результатам математического моделирования оптимальных параметров механизированной крепи и мощности верхнего слоя пласта установлено, что наименьшее среднее напряжение в кровле возникает при рабочей высоте крепи 3.5 м, оптимальной для подсечного слоя и обеспечивающей эффективную разработку угольного пласта [8].

По рекомендациям [1] выделяют три стадии дезинтеграции подкровельной толщи:

- первичную над перекрытием секции механизированной крепи;
- вторичную над загрузочно-выпускным устройством;
- третичную при движении горной массы на конвейер.

Для реализации указанных этапов дезинтеграции необходимо разработать новые способы активного воздействия на подкровельную толщу. Возможны такие варианты:

— формирование над перекрытием секции крепи на нижней поверхности подкровельной толщи уступов посредством периодического изменения в каждом цикле высоты полосы, вынимаемой очистным комбайном;

— циклическое изменение распора в гидростойках секции крепи с целью создания в подкровельной толще переменных напряжений для предразрушения угля;

— образование в подкровельной толще концентраторов предельных касательных напряжений с помощью клинообразных штампов над перекрытием секций механизированной крепи.

Для обоснования эффективности данных способов в настоящей работе используются методы математического и численного моделирования.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования — геомеханическое состояние массива горных пород при различных способах воздействия на подкровельную толщу. Деформирование горных пород можно описать линейно-упругой моделью только в зоне упругих деформаций, за пределами которой линейная связь напряжений и деформаций нарушается. На рис. 1 показана диаграмма деформирования горных пород при сжатии с выделением характерных участков упругого, необратимого и запредельного деформирования [9].

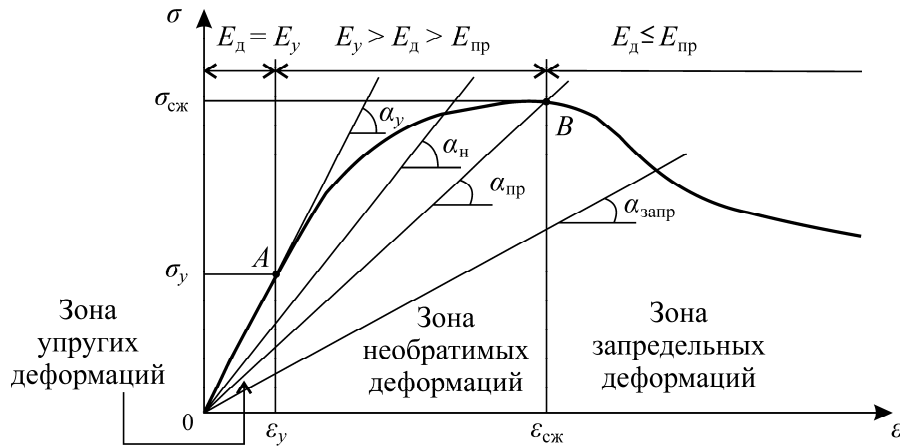


Рис. 1. Диаграмма “напряжение–деформация” при сжатии: σ_y — упругое предельное напряжение; ε_y — упругая предельная деформация; $\sigma_{сж}$, $\varepsilon_{сж}$ — пределы прочности и деформации пород в точке B ; $E_{пр} = \sigma_{сж} / \varepsilon_{сж}$ — модуль деформации в точке B ; $E_y = \sigma_y / \varepsilon_y$ — модуль упругости

В зоне упругих деформаций горные породы сохраняют свою структуру и свойства, связь между напряжениями и деформациями носит линейный характер, а модуль упругости остается постоянным. В зоне необратимых деформаций в породах происходит раскрытие микро- и макротрещин, поэтому деформирование пород характеризуется нелинейной связью между напряжениями и деформациями и уменьшением текущего модуля деформаций. В зоне запредельного деформирования вследствие формирования макротрещин и блоков изменения механических свойств пород и прогрессирующего разрушения напряжения достигают предела прочности породы, а деформирование сопровождается снижением сопротивления пород, что проявляется в спаде нагрузки на диаграмме “напряжения–деформации”. Текущий модуль деформаций в предельной точке B уменьшается в зоне запредельных деформаций. Эту область также называют зоной предразрушения.

Для вычисления текущего модуля деформаций в зоне необратимых деформаций нелинейный участок диаграммы можно аппроксимировать кривой второго порядка:

$$\sigma = a \varepsilon^2 + b \varepsilon, \quad (1)$$

коэффициенты которой определяются следующим образом:

$$a = \left(\frac{\sigma_{сж}}{\varepsilon_{сж}} - \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} \right) \frac{1}{(\varepsilon_{сж} - \varepsilon_y)} = \frac{E_{пр} - E_y}{\varepsilon_{сж} - \varepsilon_y}, \quad (2)$$

$$b = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} - \left(\frac{\sigma_{сж}}{\varepsilon_{сж}} - \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} \right) \frac{\varepsilon_y}{(\varepsilon_{сж} - \varepsilon_y)} = E_y - \frac{E_{пр} - E_y}{\varepsilon_{сж} - \varepsilon_y} \varepsilon_y,$$

После подстановки коэффициентов (2) в (1) уравнение участка диаграммы в зоне необратимых деформаций примет вид

$$\sigma = \frac{E_{пр} - E_y}{\varepsilon_{сж} - \varepsilon_y} \varepsilon^2 + \left(E_y - \frac{E_{пр} - E_y}{\varepsilon_{сж} - \varepsilon_y} \varepsilon_y \right) \varepsilon. \quad (3)$$

Одним из параметров, характеризующих площадь зоны упругих деформаций на диаграмме “напряжения–деформации”, является коэффициент хрупкости $k_{хр} = (\varepsilon_y / \varepsilon_{сж})^m$ (m — эмпирический коэффициент) [10].

Уравнение (3) при $m = 1$ представим так:

$$E_d = \frac{E_{пр} - E_y}{\varepsilon_{сж}(1 - k_{хр})}(\varepsilon - \varepsilon_y) + E_y, \quad (4)$$

$k_{хр}$ — коэффициент остаточной прочности угля или породы.

Пусть $E_d = E_y k_{хр}^n$ (n — эмпирический коэффициент), тогда с учетом $\varepsilon_y = (\sigma_{сж} k_{хр}) / E_y$, $\varepsilon_{сж} = \sigma_{сж} / (E_y k_{хр})$ уравнение (4) примет вид

$$E_d = E_y \left[1 - \frac{k_{хр}(1 - k_{хр}^n)}{\sigma_{сж}(1 - k_{хр})}(\varepsilon E_y - \sigma_{сж} k_{хр}) \right], \quad \varepsilon_y < \varepsilon < \varepsilon_{сж}. \quad (5)$$

Секущий модуль деформаций в зоне запредельных деформаций вычисляется с помощью остаточной прочности пород по формуле

$$E_d = k_{хр} E_y. \quad (6)$$

Существуют разные процедуры определения параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород с нелинейными характеристиками: варьируемой жесткости, начальных напряжений, начальных деформаций [9]. При численной реализации нелинейных задач методом конечных элементов один из подходов — последовательное решение упругой задачи сначала с постоянными, а затем и с изменяемыми геомеханическими параметрами [11].

В [12] предложен способ модификации матриц жесткости элементов с учетом механических свойств слоистого горного массива и секущих характеристик, связывающих полные напряжения и деформации. Для заданного модуля упругости по слоям матрица жесткости D имеет вид $D_i = D(E_i)$ (E_i — модуль упругости i -го слоя ($i = 1, N_c$); N_c — количество слоев). Тогда локальные матрицы жесткости конечных элементов, в зависимости от их принадлежности к угольному пласту или породному слою с заданным начальным модулем упругости, описываются соотношением

$$D_{ij} = D(E_{ij}), \quad (7)$$

где j — номер элемента ($j = 1, N$); N — количество элементов.

При упругом решении с помощью локальных матриц жесткости конечных элементов (7) строится глобальная матрица жесткости и рассчитывается система уравнений с применением стандартных процедур метода конечных элементов для определения параметров объемного напряженно-деформированного состояния геомассива, вмещающего свиту пологих или наклонных пластов. На основе анализа полученных при упругом решении параметров объемного напряженно-деформированного состояния геомассива матрицы жесткости конечных элементов модифицируются с учетом деформированного состояния горных пород в зоне влияния системы горных выработок. Для каждого элемента значение секущего модуля деформации, в зависимости от состояния породы в j -м конечном элементе i -го слоя, вычисляется следующим образом:

$$E_{dij} = \begin{cases} E_{ij} & \text{в зоне упругих деформаций;} \\ \text{по формуле (5) в зоне необратимых деформаций;} \\ \text{по формуле (6) в зоне предельных деформаций.} \end{cases} \quad (8)$$

Локальная матрица жесткости конечного элемента с учетом необратимых и запредельных деформаций примет вид $Dc_{ij} = D(E_{dij})$. При нелинейном решении с применением локальных матриц жесткости конечных элементов (8) строится глобальная матрица и повторно рассчитывается система уравнений для определения перемещений в узлах элементов и параметров объемного напряженно-деформированного состояния массива горных пород, вмещающего свиту угольных пластов.

Для оценки эффективности указанных технологических решений проведено численное моделирование геомеханических процессов в угольном пласте и вмещающих его породах с использованием комплекса проблемно-ориентированных программ [13]. Критерием оценки эффективности разрушения угля принято отношение остаточной прочности угля к исходной, которая определялась по паспорту прочности угля при объемном напряженно-деформированном состоянии угольного пласта и вмещающих его пород. Нормальные и касательные напряжения вычислялись методом конечных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для повышения эффективности разработки мощных пологих пластов с выпуском угольной пачки на забойный конвейер предлагается формировать в подкровельной толще продольные каналы, приводящие к нарушению сплошности массива и разрушению целиков между каналами при распоре секций крепи (рис. 2) [14]. По мере подвигания очистного забоя подготовка массива угля к выпуску происходит при воздействии знакопеременных нагрузок со стороны перекрытия секции крепи.

Для выбора рациональных вариантов управления начальным распором секций крепи и влиянием каналов в угольной пачке по результатам численного моделирования проанализировано воздействие начального распора секций крепи при отсутствии и наличии каналов в подкровельной толще на следующие основные геомеханические параметры: отношение остаточной прочности к исходной; вертикальные смещения, мм; максимальные касательные напряжения, МПа; коэффициент концентрации вертикальных напряжений. Начальный распор секций крепи во всех вариантах изменялся в пределах 500 – 4000 кН.

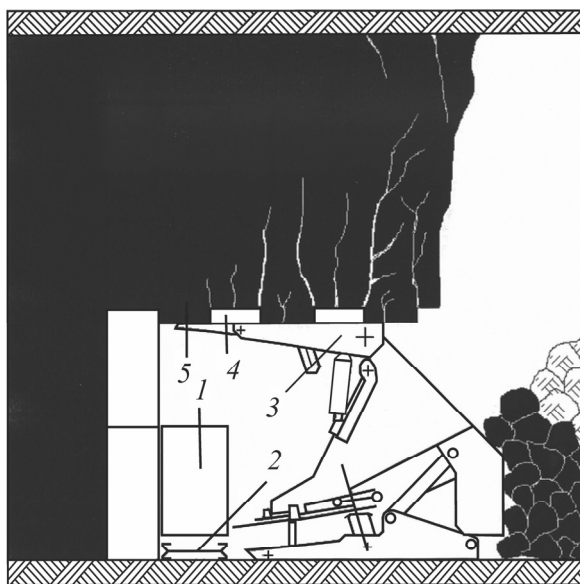


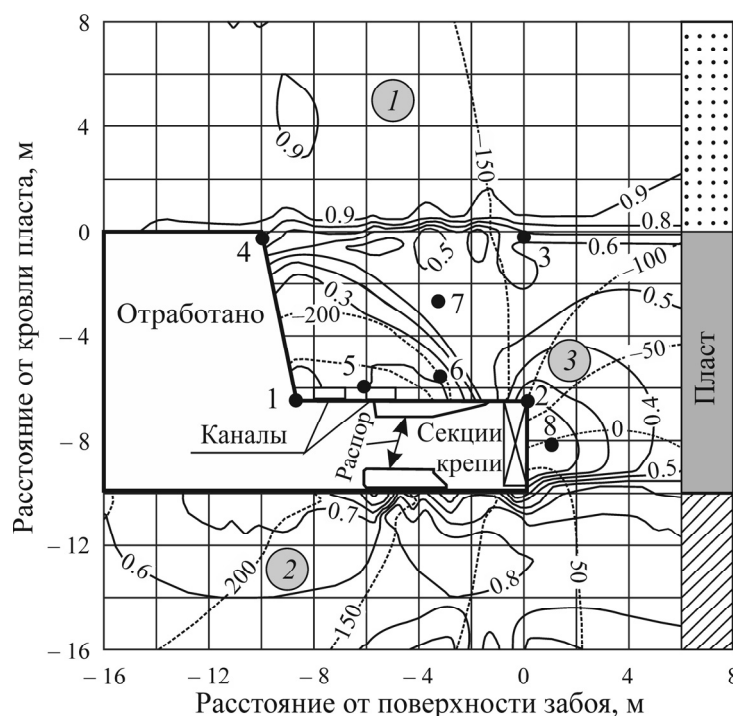
Рис. 2. Формирование продольных каналов и целиков в подкровельной толще: 1 — очистной комбайн; 2 — скребковый конвейер; 3 — секция механизированной крепи; 4 — продольные каналы; 5 — целики между каналами

По результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород на рис. 3 показаны изолинии распределения отношения остаточной прочности угля и пород к исходной при воздействии на подкровельную толщу посредством формирования в ней продольных каналов шнеком очистного комбайном путем увеличения мощности каждой второй вынимаемой полосы. В угольных целиках повышаются вертикальные напряжения, возникают неравномерные касательные напряжения и деформации, что приводит к разрушению целиков и подкровельной толщи. На рис. 3 видны изменения отношения остаточной прочности угля к исходной, где в зоне воздействия каналов в нижней части подкровельной толщи прочность угля снижается. Однако вес подкровельной толщи и зависающих пород кровли перераспределяется на краевой участок угольного пласта, вследствие чего увеличивается отжим угля в очистном забое.

В соответствии с результатами моделирования установлено, что на отношения остаточной прочности к исходной влияют следующие факторы: количество и размеры каналов, распор секций механизированной крепи. С учетом большого объема получаемой при моделировании информации на рис. 3 намечены характерные точки 1–8, в которых определены основные геомеханические параметры. В пределах четырехугольника 1–2–3–4 для каждого варианта вычисляется средневзвешенное отношение остаточной прочности к исходной:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n s_i r_i}{\sum_{i=1}^n s_i},$$

где n — количество конечных элементов; s_i — площадь i -го конечного элемента; r_i — отношение остаточной прочности к исходной в i -м конечном элементе.



Результаты моделирования различных вариантов изменения начального распора секций крепи, ширины и высоты каналов в подкровельной толще представлены в таблице.

Результаты численного эксперимента предразрушения и деформирования подкровельной толщи

Подкровельная толща	Распор крепи, кН	Отношение остаточной прочности к исходной			Вертикальные смещения, мм	
		подкровельная толща	зона выпуска (точка 5)	очистной забой (точка 2)	зона выпуска (точка 5)	очистной забой (точка 2)
Сплошная	500	0.44	0.26	0.36	160	111
С каналами	500	0.45	0.27	0.33	159	101
Сплошная	1000	0.49	0.58	0.34	148	95
С каналами	1000	0.51	0.56	0.33	150	100
Сплошная	2000	0.65	0.63	0.24	131	98
С каналами	2000	0.64	0.58	0.35	132	98
Сплошная	3000	0.65	0.45	0.36	116	96
С каналами	3000	0.65	0.48	0.42	120	96
Сплошная	4000	0.65	0.45	0.39	106	102
С каналами	4000	0.65	0.39	0.36	109	95

На рис. 4а показано изменение отношения остаточной прочности угля к исходной в пределах всей подкровельной толщи (рис. 3, контур 1–2–3–4). Уменьшение начального распора секций крепи в интервале 2000–500 кН приводит к снижению прочности угля в подкровельной толще в 1.4 раза, т. е. распор крепи — управляющий фактор при регулировании гранулометрического состава горной массы и дозировании ее выпуска (рис. 4а). Увеличение распора секций крепи > 2000 кН не влияет на изменение прочности угля в пределах всей подработанной подкровельной толщи. Воздействие каналов в подкровельной толще на отношение остаточной прочности к исходной не выявлено.

Наиболее актуальным фактором для организации управляемого извлечения горной массы подкровельной толщи является степень предразрушения угля в зоне выпуска (точка 5, рис. 3). Изменения отношения остаточной прочности к исходной в подкровельной толще в точке 5 представлены на рис. 4б.

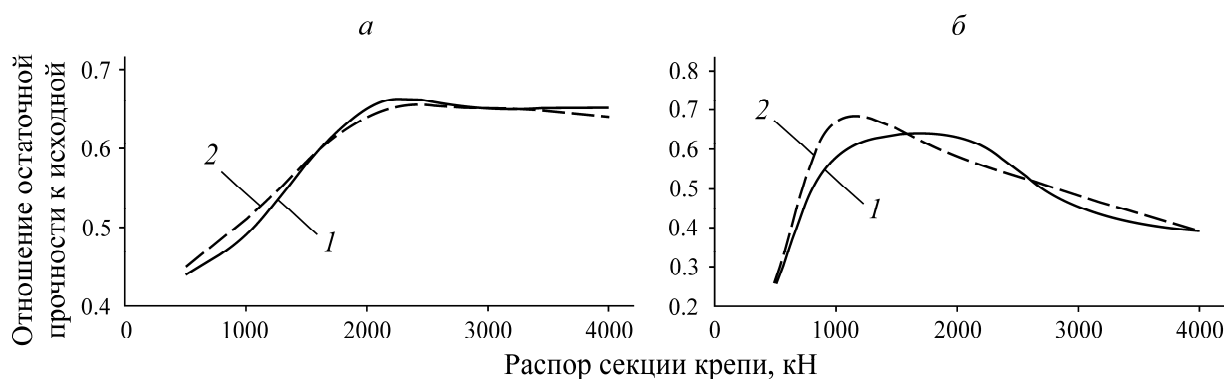


Рис. 4. Изменение отношения остаточной прочности угля к исходной в подкровельной толще от начального распора секций механизированной крепи (а) и в зоне выпуска от начального распора секций механизированной крепи (б): 1 — без каналов в подкровельной толще; 2 — с каналами в ней

В зоне выпуска горной массы и над перекрытием секций крепи отношение остаточной прочности к исходной при уменьшении начального распора крепи снижается (рис. 4б). С увеличением распора крепи в интервале 1000–2000 кН происходит уплотнение подкровельной толщи при упругом деформировании угля, а после перехода угля в упругопластическое состояние его остаточная прочность постепенно уменьшается. Максимальное отношение остаточной прочности угля к исходной соответствует распору 2000 кН (рис. 4).

При увеличении распора секций крепи вертикальные смещения подкровельной толщи в зоне выпуска линейно уменьшаются (рис. 5). Вследствие роста горизонтальных смещений и касательных напряжений при распоре крепи > 2000 кН подкровельная толща перемещается в сторону выработанного пространства, т. е. возникают вертикальные и кососекущие трещины и угольный массив разрушается под влиянием растягивающих горизонтальных напряжений. Установлено более интенсивное снижение, в 1.15 раза, отношения остаточной прочности к исходной при наличии каналов в подкровельной толще. Кроме геомеханических параметров в зоне выпуска, на эффективность и безопасность очистных работ в подсечном слое влияет состояние краевой части угольного пласта (точки 2, 8, рис. 3). Интенсивное воздействие распора крепи сказывается на устойчивости угольного массива между очистным забоем и козырьком секций механизированной крепи (точка 2, рис. 3). При формировании каналов в подкровельной толще извлекается часть разрушенного угля, а вероятность обрушения подкровельной толщи на забойный конвейер снижается по сравнению с традиционным вариантом без образования каналов.

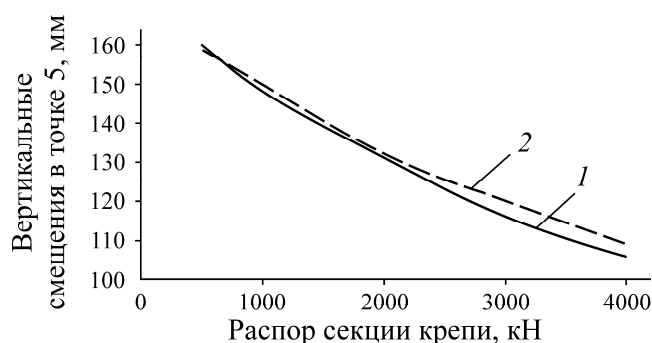


Рис. 5. Зависимости вертикальных смещений в подкровельной толще в зоне выпуска от начального распора секций механизированной крепи: 1 — без каналов в подкровельной толще; 2 — с каналами в ней

Выполнена оценка влияния начального распора секций крепи на напряженно-деформированное состояние краевой части пласта впереди очистного забоя подсечного слоя (точка 8, рис. 3). При увеличении начального распора коэффициент концентрации вертикальных напряжений впереди забоя уменьшается, т. е. при интенсивном отжиме угля с поверхности пласта в очистном забое рекомендуется увеличивать начальный распор секций крепи (рис. 6).

При распоре до 2000 кН и наличии каналов в подкровельной толще коэффициент концентрации вертикальных напряжений в краевой части пласта повышен, что связано с уменьшением площади опоры подкровельной толщи на перекрытие и перераспределением давления зависающих пород кровли на угольный пласт.

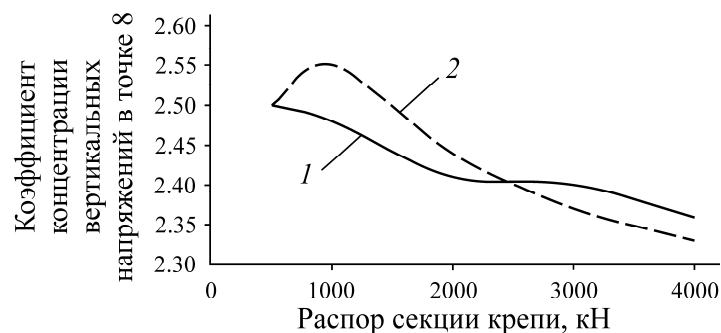


Рис. 6. Изменение коэффициента концентрации вертикальных напряжений в краевой части пласта от начального распора секций механизированной крепи: 1 — без каналов в подкровельной толще; 2 — с каналами в ней

ВЫВОДЫ

На основе установленных закономерностей геомеханических процессов в подкровельной толще мощного угольного пласта, подрабатываемой подсечным слоем с выпуском горной массы на забойный конвейер, рекомендуется разработать конструкцию секции крепи с переменным профилем, выделяя поддерживающую переднюю часть секции крепи между краевой частью пласта и гидростойкой. Это даст возможность предотвратить отжим угля в забое посредством увеличения начального распора в передней части секции крепи.

Способ предварительного формирования продольных каналов в массиве подкровельной толщи по мере подвигания очистного забоя приводит к неравномерному распределению сил горного давления и распорных усилий со стороны секции крепи, что обеспечивает интенсивное трещинообразование, разупрочнение массива и подготовку его к выпуску. Численные исследования характера изменения основных геомеханических параметров в подкровельной толще при варьировании начального распора секций крепи и количества каналов позволяют выбирать оптимальный режим управления механизированным комплексом и системой мониторинга состояния угля над секциями крепи для организации автоматизированного дозированного выпуска горной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коровкин Ю. А., Савченко П. Ф. Теория и практика длиннолавных систем. — М.: Горн. дело, 2012. — 808 с.
2. Клишин В. И., Шундулиди И. А., Ермаков А. Ю., Соловьев А. С. Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля. — Новосибирск: Наука, 2013. — 248 с.
3. Клишин В. И., Фрянов В. Н., Павлова Л. Д., Опрук Г. Ю. Моделирование дезинтеграции подкровельной толщи при отработке мощного пласта с выпуском угля на забойный конвейер // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 79–88.
4. Калинин С. И., Новосельцев С. А., Галимарданов Р. Х., Ренев А. А., Филимонов К. А., Тимошенко А. М., Федорович А. П. Отработка мощного угольного пласта механизированным комплексом с выпуском подкровельной пачки. — Кемерово: КузГТУ, 2011. — 224 с.
5. Jabinpoura A., Bafghib A. Y., Gholamnejadc J. Application of vibration in longwall top coal caving method, Int. J. of Sci. and Eng., 2016, Vol. 3, No. 2. — P. 102–109.

6. Yetkin M. E., Arslan A. T., Özfirat M. K., Kahraman B., and Yenice H. Numerical modelling of stress-strain analysis in underground thick coal mining, *Int. J. of Eng. Res. and Tech.*, 2018, Vol. 7, Issue 04. — P. 199–204.
7. Le T. D., Mitra R., Oh J., and Hebblewhite B. A review of cavability evaluation in longwall top coal caving, *Int. J. of Min. Sci. and Tech.*, 2017, Vol. 27. — P. 907–915.
8. Еткин М. Э., Симсир Ф. Обоснование рациональной высоты секции механизированной крепи с учетом напряжений в кровле // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 29–35.
9. Амусин Б. З., Фадеев А. Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. — М.: Недра, 1975. — 143 с.
10. Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А., Петров А. И. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: справочник. — М.: Недра, 1994. — 447 с.
11. Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Адаптация метода конечных элементов для решения нелинейной задачи расчета параметров объемного напряженно-деформированного состояния разрушаемого углепородного массива // ГИАБ. — 2008. — № 4. — С. 71–76.
12. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987. — 221 с.
13. Корнев Е. С., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов методом конечных элементов // Вест. КузГТУ. — 2013. — № 2. — С. 65–69.
14. Пат. 2703079 РФ, МПК E21C 41/18 (2006-01-01). Способ разработки мощного пологого пласта с выпуском угля подкровельной толщи / В. И. Клишин, Б. А. Анферов, Л. В. Кузнецова, И. Л. Борисов, Е. Л. Варфоломеев // Опубл. в БИ. — 2019. — № 29. — 5 с.

Поступила в редакцию 07/V 2020

После доработки 10/V 2020

Принята к публикации 29/V 2020