

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.831.245:004.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ ПРИ ОТРАБОТКЕ МОЩНОГО ПЛАСТА С ВЫПУСКОМ УГЛЯ НА ЗАБОЙНЫЙ КОНВЕЙЕР

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

¹Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,

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

²Сибирский государственный индустриальный университет,

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

Разработана геомеханическая модель системы “механизированная крепь – подкровельная толща – породы кровли”. Для исследования процессов дезинтеграции подкровельной толщи при отработке мощного угольного пласта проведено численное моделирование с дискретизацией исследуемой геометрической модели на конечные элементы и использованием авторского комплекса программ. По результатам вычислительных экспериментов выявлены закономерности распределения напряжений в массиве горных пород, обоснованы положение, формы и размеры зон самообрушения угля подрабатываемой подкровельной толщи.

Угольный пласт, кровля пласта, подкровельная толща, напряжения, дезинтеграция, метод конечных элементов, численный эксперимент

DOI: 10.15372/FTPRPI20190209

Проблема эффективной и безопасной отработки подземным способом мощных угольных пластов всегда актуальна, так как это обеспечивает низкий удельный объем проведения подготовительных выработок и высокую концентрацию горных работ при нагрузках на очистной забой более 1000 тыс. т угля в год. Этим условиям соответствует технологическая схема механизированной выемки угля в одном слое мощного угольного пласта с выпуском подкровельной толщи [1 – 3]. Технологическая схема включает следующие процессы: механизированная выемка и транспорт угля в нижнем слое, выпуск горной массы подкровельной толщи на конвейер нижнего слоя. Опыт применения технологии разработки мощных пластов с выпуском в условиях Томь-Усинского месторождения Кузбасса показал, что одной из нерешенных проблем является управление процессами разрушения и подготовки угля подкровельной толщи к выпуску [2, 3].

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.” по теме “Разработка технологии эффективного освоения угольных месторождений роботизированным комплексом с управляемым выпуском подкровельной толщи” (Соглашение № 14.604.21.0173 от 26.09.2017 г.).

Наиболее информативными методами решения указанных проблем являются методы математического и численного моделирования. В [4–8] исследованы траектории движения разрыхленного угля подкровельной толщи на конвейер нижнего слоя для модели сыпучего материала и по результатам моделирования установлены формы и размеры воронок выпуска, а также изменения нагрузки со стороны движущейся горной массы на элементы механизированной крепи.

В настоящей работе предложен способ моделирования процесса разрушения угля подкровельной толщи, формирования блочной структуры угольного массива, разрыхленной горной массы и условий выпуска ее на питатель секции механизированной крепи. Для выявления закономерностей предразрушения, разрушения и выпуска угля подкровельной толщи проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния системы “механизированная крепь – подкровельная толща – породы кровли”.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований принята технология разработки мощных пластов в один слой с выпуском угля подкровельной толщи. Предполагается широкое применение этой технологии при отработке мощных пластов Ольжерасского, Кондомского, Мрасского, Томского месторождений Кузбасса.

Для моделирования рассмотрены горно-геологические условия пласта III на участке “Поле шахты № 2”. Пласт III содержит более 8 прослоев породы мощностью 0.05–0.40 м, представленных аргиллитами и алевролитами. Мощность пласта от 7.86 до 13.03 м (в среднем 10.64 м). Выше пласта III на расстоянии 38–40 м залегает пласт I. Ложная кровля представлена аргиллитами, непосредственная кровля мощностью 17.4 м — алевролитами крупно- и мелкозернистыми. На границе непосредственной и основной кровли на расстоянии 17 м от кровли пласта III расположен тонкий угольный пласт мощностью 0.1–0.4 м. Основная кровля представлена песчаниками светло-серыми, мелкозернистыми, характеризуется как труднообрушающаяся. Непосредственная почва выполнена алевролитами мелкозернистыми с переслаиванием алевролитов с песчаниками, местами трещиноватая. Пласт III склонный к газодинамическим явлениям.

Пласт III отрабатывается системой разработки длинными столбами с выемкой нижнего мощностью 3.6 м слоя комбайном под секциями механизированной крепи и выпуском подкровельной толщи на забойный конвейер. Длина лавы 200 м, длина столба по простиранию пласта 700 м, угол падения пласта 0°. Для отработки пласта III предлагается применять механизированный комплекс с дозируемым выпуском угля питателями (рис. 1).

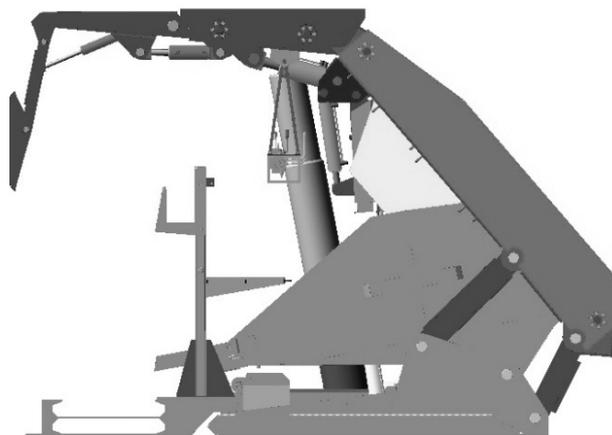


Рис. 1. Механизированная крепь с регулируемым выпуском угля на забойный скребковый конвейер

Конструкция механизированной крепи с устройством регулируемого выпуска угля на забойный конвейер разработана в Институте угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН с учетом геомеханических процессов, происходящих в угольном пласте и породах кровли, содержит достоинства известных вариантов и исключает их недостатки [1]. Контактная граница “уголь – порода” опускается одновременно, чем достигается площадно-управляемый выпуск угля.

Задача решается в вариационной постановке

$$\delta \mathcal{E} = 0, \quad (1)$$

где $\mathcal{E} = (u, v, w, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz})$ — полный функционал теории упругости, в котором все компоненты векторов напряжений, деформаций и перемещений считаются независимыми; δ — вариация функционала по всем независимым переменным.

Для вариационного принципа (1) уравнениями Эйлера и естественными граничными условиями являются статические, геометрические и физические дифференциальные уравнения теории упругости с соответствующими граничными условиями. Согласно принципу минимума для перемещений Лагранжа,

$$\mathcal{E}(u, v, w) = 0. \quad (2)$$

Математическая модель строится в виде краевой задачи теории упругости для уравнений Ламе, полученных как синтез статических, геометрических и физических уравнений:

$$\begin{cases} (\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial x} + G \nabla^2 u + X = 0; \\ (\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial y} + G \nabla^2 v + Y = 0; \\ (\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial z} + G \nabla^2 w + Z = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\lambda = \nu E / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]$, $\mu = G$ — параметры Ламе; G — модуль сдвига; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; $\theta = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z$ — объемная деформация; ∇^2 — оператор Лапласа; $\nabla^2 () = \partial^2 () / \partial x^2 + \partial^2 () / \partial y^2 + \partial^2 () / \partial z^2$; (u, v, w) — компоненты перемещений [9].

Граничные условия с учетом закона Гука и условий Коши имеют вид

$$\begin{cases} X_\nu = \lambda \theta l + G \left(\frac{\partial u}{\partial x} l + \frac{\partial u}{\partial y} m + \frac{\partial u}{\partial z} n \right) + G \left(\frac{\partial u}{\partial x} l + \frac{\partial v}{\partial x} m + \frac{\partial w}{\partial x} n \right); \\ Y_\nu = \lambda \theta m + G \left(\frac{\partial v}{\partial x} l + \frac{\partial v}{\partial y} m + \frac{\partial v}{\partial z} n \right) + G \left(\frac{\partial u}{\partial y} l + \frac{\partial v}{\partial y} m + \frac{\partial w}{\partial y} n \right); \\ Z_\nu = \lambda \theta n + G \left(\frac{\partial w}{\partial x} l + \frac{\partial w}{\partial y} m + \frac{\partial w}{\partial z} n \right) + G \left(\frac{\partial u}{\partial z} l + \frac{\partial v}{\partial z} m + \frac{\partial w}{\partial z} n \right), \end{cases} \quad (4)$$

l, m, n — направляющие косинусы внешней нормали.

При численном решении функционал преобразуется в алгебраическое выражение путем замены интегрирования суммированием, а дифференцирования — численным дифференцированием по соответствующим конечно-разностным формулам, что позволяет систему диффе-

ренциальных уравнений Эйлера заменить системой алгебраических уравнений с искомыми значениями функции в узлах сетки. При решении задачи теории упругости в перемещениях методом конечных элементов необходимо минимизировать потенциальную энергию системы для нахождения узловых значений вектора перемещений. Полная потенциальная энергия упругой системы Π состоит из энергии деформации Λ и энергии приложенных поверхностных сил W , работа которых W_p противоположна по знаку их потенциальной энергии $W = -W_p$: $\Pi = \Lambda - W$.

Для исследования процессов дезинтеграции подкровельной толщи метод конечных элементов адаптирован к горно-геологическим условиям залегания мощных пологих пластов и технологии их разработки в один слой с выпуском подкровельной толщи. Фрагмент дискретизации исследуемой геометрической модели на конечные элементы показан на рис. 2.

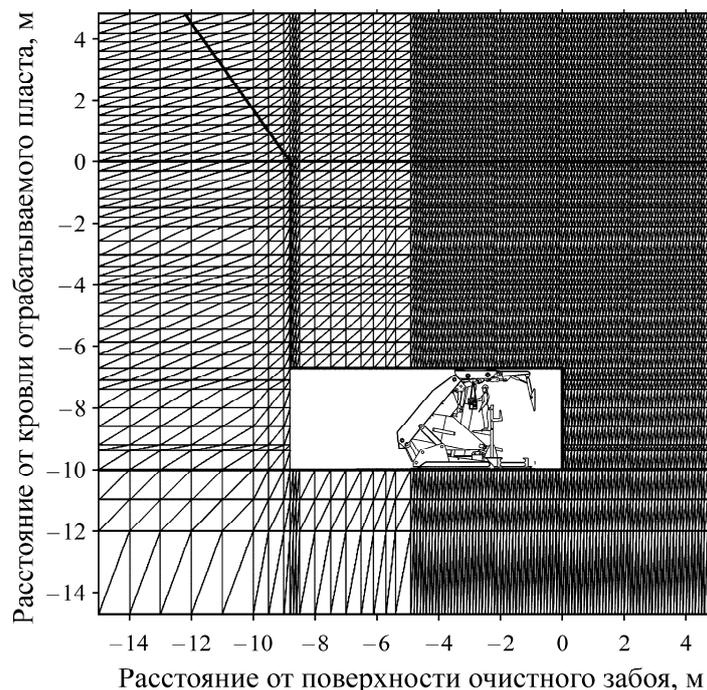


Рис. 2. Фрагмент дискретизации геометрической модели в зоне влияния очистного забоя

Приняты следующие параметры геометрической модели:

- вертикальный разрез массива горных пород по оси выемочного столба имеет длину 700 м, расстояние от земной поверхности до кровли пласта 480 м, угол падения пласта 0° ;
- длина очистного выработанного пространства равна 150 м, что примерно соответствует длине шага обрушения налегающей толщи пород кровли;
- мощность нижнего слоя, обрабатываемого очистным комбайном под секциями механизированной крепи, 3.6 м, мощность подкровельной толщи 7.2 м;
- начало координат по горизонтальной оси абсцисс принято в краевой части пласта на линии очистного забоя; по вертикальной оси ординат начало координат расположено в кровле пласта III.

Осуществляется поэтапное решение задач упругого и упругопластического деформирования неоднородного массива горных пород с разными механическими характеристиками слоев и условиями жесткого контакта между ними [10, 11]. На первых двух этапах исследований находятся решения краевых задач теории упругости в перемещениях для нетронутого массива горных пород и после проведения выработок.

На третьем этапе для выявления формы и границ зон предразрушения угля и вмещающих пород в окрестности очистного забоя осуществляется решение нелинейной задачи с использованием методических подходов, изложенных в [12, 13]. Для определения секущего модуля деформации угля или пород в каждом конечном элементе использована энергетическая теория прочности. В качестве критерия предразрушения угля в подкровельной толще принят коэффициент дезинтеграции, рассчитываемый по формуле

$$K_d = \frac{E_{f1}}{E_{f3}},$$

где E_{f1} — энергия формоизменения угля при одноосном сжатии или растяжении; E_{f3} — энергия формоизменения угля при трехосном напряженном состоянии [14].

Выбор отношения энергий формоизменения в качестве критерия предразрушения обусловлен следующими факторами:

— формирование блочно-сыпучей среды в подкровельной толще под влиянием напряжений и деформаций происходит посредством раскрытия природных и техногенных трещин, изменения формы блоков в процессе их перемещения к зоне выпуска;

— напряженно-деформированное состояние подкровельной толщи над секциями крепи в зоне выпуска близкое к одноосному, так как за секциями крепи и с боку соседней секции, над которой уже проведен выпуск горной массы, влияние горизонтальных сил несущественное.

Энергия формоизменения единичного кубического элемента при трехосном напряженном состоянии определяется по формуле

$$E_{f3} = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \frac{1}{2G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2). \quad (5)$$

Здесь $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz})$ — компоненты нормальных и касательных напряжений.

Зависимость энергии формоизменения единичного кубического элемента при одноосном сжатии или растяжении, как частный случай формулы (5), имеет вид

$$E_{f1} = \frac{1+\nu}{3E} R^2,$$

где R — предел прочности угля или породы при одноосном сжатии или растяжении в зависимости от знака вертикального напряжения σ_z :

$$R = \begin{cases} \sigma_c & \text{при } \sigma_z < 0; \\ \sigma_r & \text{при } \sigma_z > 0, \end{cases}$$

σ_c, σ_r — пределы прочности угля при сжатии и растяжении соответственно.

По результатам сопоставления коэффициента дезинтеграции с результатами натуральных эндоскопических съемок стенок скважин и визуальных наблюдений состояния угольного пласта в боках очистных и подготовительных выработок установлены критерии для выделения границ зон формирования блочно-сыпучей среды в подкровельной толще (таблица).

На диаграмме “напряжение – деформация” в зоне упругого деформирования энергия формоизменения в угольном массиве меньше соответствующей энергии при одноосном сжатии или растяжении угля. На упругопластическом участке энергия формоизменения несколько превышает энергию при одноосном сжатии. На запредельном участке происходит интенсивное разрыхление деформируемого материала за счет энергии формоизменения, которая значительно превышает энергию при одноосном сжатии, что подтверждается на практике [15]. Например, в очистном забое при отработке мощного пласта с оставлением в кровле угольной

пачки происходит ее разрушение за секциями механизированной крепи [16]. На горизонтальном участке зоны запредельного деформирования остаточная прочность угля соответствует прочности разрыхленного насыпного угля.

Критерии выделения границ зон формирования блочно-сыпучей среды

Критерий	Состояние угля	Зоны деформирования угля на диаграмме “напряжение – деформация”
$K_d > 1.0$	Природное состояние угля	Зона упругого деформирования
$0.5 < K_d \leq 1.0$	Раскрытие мелких трещин, частичная дезинтеграция угля, формирование блочной структуры	Зона упругопластического деформирования
$0.3 \leq K_d \leq 0.5$	Раскрытие крупных трещин, сдвиг по поверхностям ослабления и отжим угля в виде блоков и плит	Зона запредельного деформирования на участке спада
$K_d \leq 0.3$	Разрушение угля, вывалы кусков и распределение их под углом естественного откоса	Зона запредельного деформирования на горизонтальном участке

При решении нелинейной задачи модули упругости и деформации определяются по диаграмме “напряжение – деформация” как отношения напряжений к соответствующим относительным деформациям или по углу наклона касательной в точках предельного и запредельного деформирования. На рис. 3 показана зависимость модуля деформации от коэффициента дезинтеграции угольного пласта подкровельной толщи.



Рис. 3. Изменение модуля деформации от коэффициента дезинтеграции

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для вычислительных экспериментов с целью изучения характера дезинтеграции подкровельной толщи и взаимодействия элементов системы “механизированная крепь – подкровельная толща – породы кровли” в зависимости от напряженного состояния подкровельной толщи и основной кровли рассмотрены следующие две расчетные схемы.

Схема 1. Нижний слой пласта полностью отработан, подкровельная толща в выработанном пространстве выпущена, частично зависает в виде консоли над секциями механизированной крепи.

Схема 2. Нижний слой пласта полностью отработан, подкровельная толща в выработанном пространстве выпущена, породы основной кровли обрушены в зоне полной подработки, подкровельная толща частично зависает в виде консоли над секциями механизированной крепи.

Численное моделирование проведено с использованием разработанного в СибГИУ авторского комплекса проблемно-ориентированных программ [17]. В процессе моделирования рассмотрено более 120 вариантов расположения очистного забоя, подкровельной толщи, непосредствен-

ной и основной кровли. В качестве результатов вычислительных экспериментов получены распределения напряжений, деформаций, коэффициента дезинтеграции угля и пород в конечных элементах, а также сдвигения массива горных пород и элементов механизированной крепи.

На рис. 4 приведены изолинии распределения вертикальных напряжений в массиве горных пород в окрестности очистного забоя до первичного обрушения пород основной кровли (схема 1). Как следует из анализа полученных результатов, зависание подкровельной толщи и распор секций механизированной крепи в окрестности очистного забоя приводят к формированию зон сжатия впереди очистного забоя и разгрузке зависающей консоли подкровельной толщи.

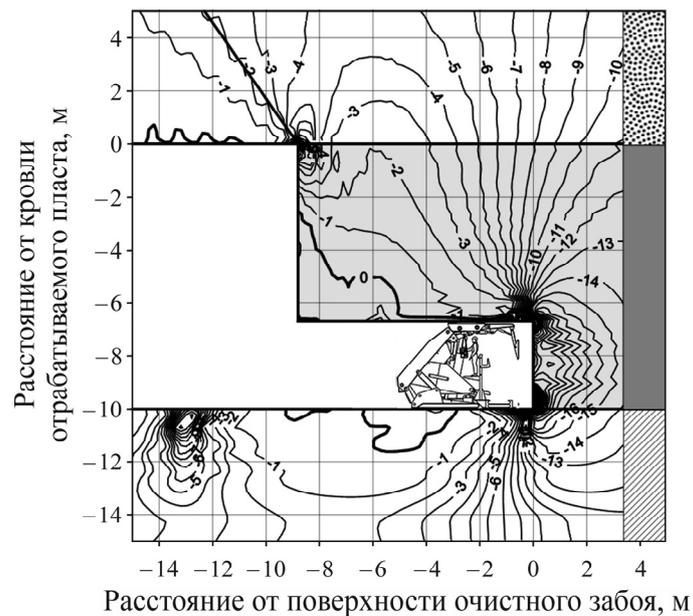


Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений (МПа) в угольном пласте и вмещающих породах до первичного обрушения пород основной кровли

Вертикальные напряжения почти в 2 раза превышают предел прочности угля в зоне резания его комбайном, что приведет к интенсивному отжиму угля. Это соответствует характеру распределения коэффициента дезинтеграции угля впереди очистного забоя (рис. 5). Глубина зоны отжима угля в очистном забое может достигать 0.8–1.0 м. Результаты моделирования подтверждаются шахтными измерениями отжима угля в очистном забое, приведенными в [1–3, 6–10], согласно которым глубина отжима достигала 0.5 м при глубине разработки пласта 200 м. Учитывая, что пласт III залегает на глубине 480 м, вероятная ширина зоны отжима угля составит 1.0–1.2 м, что соответствует результатам моделирования.

Зона растяжения угля выявлена только в нижней части зависающей консоли подкровельной толщи и над перекрытием секции механизированной крепи (рис. 5). В этих зонах возможно разрушение угля в виде блоков. При зависании пород основной кровли отчетливо выделяется зона разрушенного угля в форме треугольника над секциями механизированной крепи и устойчивое состояние пород непосредственной кровли, что обеспечит равномерный выпуск горной массы на забойный конвейер без существенного ее разубоживания. Наиболее опасным участком проявления горного давления является сопряжение основания подкровельной толщи кровли нижнего слоя и краевой части пласта, где отжим угля, высокие локальные концентрации вертикальных напряжений и коэффициент дезинтеграции < 0.4 могут привести к формированию в подкровельной толще вывалов угля впереди очистного забоя и потере устойчивости секций механизированной крепи при их передвижке.

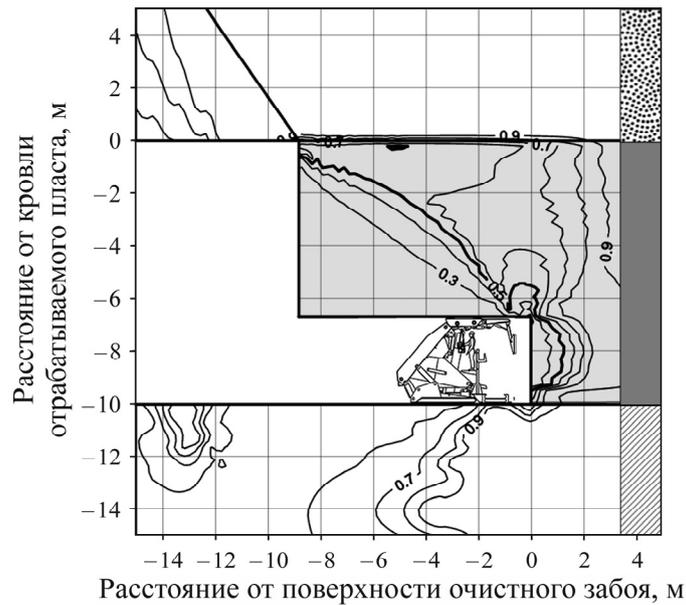


Рис. 5. Распределение коэффициента дезинтеграции угля и вмещающих пород до первичного обрушения пород основной кровли

После обрушения пород кровли (схема 2) характер распределения вертикальных напряжений существенно изменяется (рис. 6). Из результатов сравнения характера и величин распределения вертикальных напряжений на рис. 4 и 6 следует, что максимальные вертикальные напряжения после обрушения пород основной кровли уменьшились в 1.6 раза, зона разгрузки в подкровельной толще переместилась в сторону очистного забоя. Это можно объяснить влиянием подпора обрушенных пород на торцовую часть подкровельной толщи.

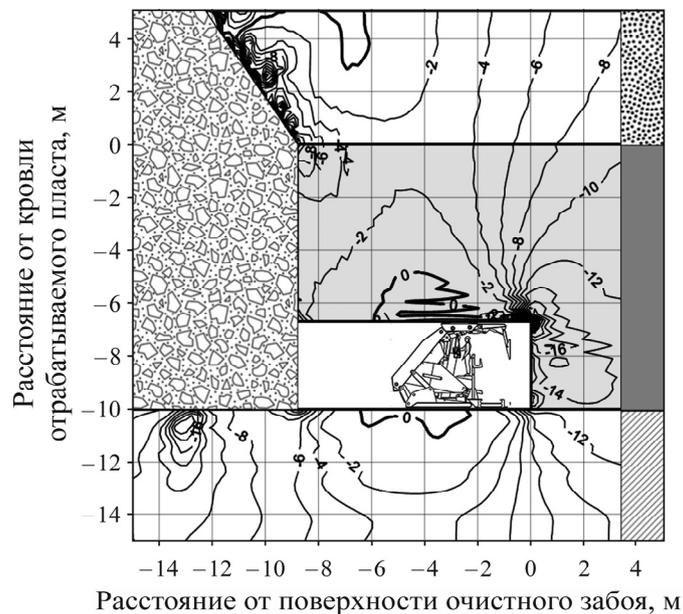


Рис. 6. Распределение вертикальных напряжений (МПа) в угольном пласте и вмещающих породах после первичного обрушения пород основной кровли

По величинам касательных напряжений выявлено возможное проскальзывание по контакту “верх подкровельной толщи – породы непосредственной кровли”, что вызовет формирование в верхней части подкровельной толщи крупных блоков и нарушение режима выпуска угля. Это

подтверждается характером распределения коэффициента дезинтеграции угля в подкровельной толще после обрушения пород основной кровли (рис. 7). Согласно результатам анализа характера распределения коэффициента дезинтеграции, интенсивное разрушение угля следует ожидать в подкровельной толще над и за секциями механизированной крепи. Сохраняется опасность прорыва угольной массы впереди козырька секции.

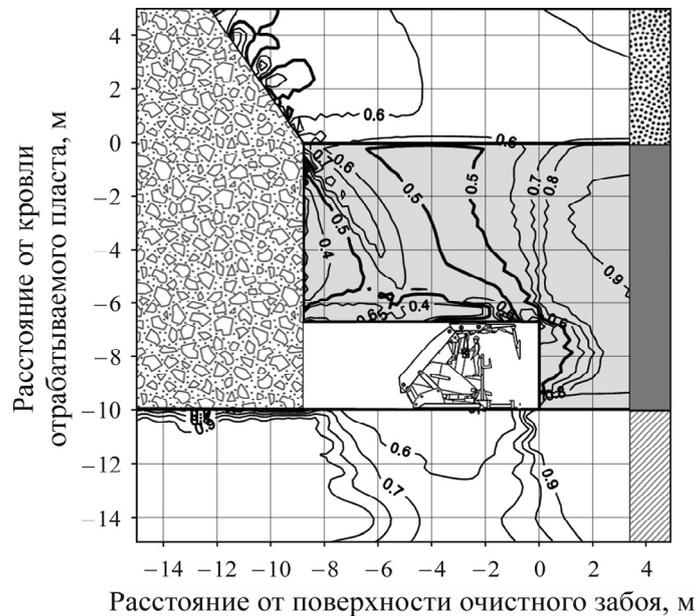


Рис. 7. Распределение коэффициента дезинтеграции угля и вмещающих пород после обрушения пород основной кровли

Характерной особенностью формирования зон разрушения до и после первичного обрушения пород основной кровли является увеличение зоны разрушения пород кровли после обрушения, что может привести к повышению зольности выпускаемой на конвейер горной массы.

ВЫВОДЫ

Выявленные закономерности распределения коэффициента дезинтеграции, вертикальных и горизонтальных напряжений в массиве горных пород в окрестности очистного забоя до обрушения пород основной кровли позволяют обосновать вероятность формирования в подкровельной толще вывалов угля впереди очистного забоя и снижение устойчивости секций механизированной крепи при их передвижке. После обрушения пород основной кровли и частичного заполнения выработанного пространства обрушенными породами над секциями крепи могут возникать участки интенсивного разрушения угля, в пределах которых возможно формирование в верхней части подкровельной толщи крупных блоков угля и породы, что приведет к нарушению режима выпуска угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Калинин С. И., Новосельцев С. А., Галимарданов Р. Х., Ренев А. А., Филимонов К. А. Отработка мощного угольного пласта механизированным комплексом с выпуском подкровельной пачки. — Кемерово: КузГТУ, 2011. — 224 с.

3. Сенкус В. В., Ермаков А. Ю. Результаты испытаний технологии отработки мощных пологих пластов с выпуском угля // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2016. — № 3. — С. 97–98.
4. Zhang J. W., Wang J. C., Wei W. J., Chen Y., and Song Z. Y. Experimental and numerical investigation on coal drawing from thick steep seam with longwall top coal caving mining, Arabian J. of Geosciences, 2018, Vol. 11, No. 5. — P. 96.
5. Wei W., Song Z., and Zhang J. Theoretical equation of initial top-coal boundary in longwall top-coal caving mining, Int. J. Mining and Mineral Engineering, 2018, Vol. 9, No. 2. — P. 157–176.
6. Yasitli N. E. and Unver B. 3-D numerical modelling of stresses around a longwall panel with top coal caving, J. of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, Vol. 105. — P. 287–300.
7. Клишин С. В., Клишин В. И., Опрук Г. Ю. Моделирование процесса выпуска угля при механизированной отработке мощных крутопадающих угольных пластов // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 105–116.
8. Клишин С. В., Клишин В. И., Опрук Г. Ю. Математическое моделирование гравитационного движения разупрочненной горной массы в технологии с выпуском подкровельной толщи // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2018. — № 4. — С. 80–85.
9. Писаренко Г. С., Можаровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. — Киев: Наук. думка, 1981. — 496 с.
10. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
11. Серяков В. М. Моделирование деформационных процессов в районе выемки угольного пласта при учете контактного взаимодействия пород в подработанной слоистой толще // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — Новокузнецк: СибГИУ, 2018. — № 4. — С. 92–98.
12. Цветков А. Б., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Нелинейная математическая модель геомеханического состояния угленосного массива // ГИАБ. — 2015. — № 1. — С. 365–370.
13. Pavlova L. D. and Fryanov V. N. Geomechanical evaluation of deep-level robotic coal mining by the results of numerical modeling, Gornyi Zhurnal, 2018, No. 2. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.07. Режим доступа: <http://www.rudmet.ru/journal/1700/article/29193/?language=en>.
14. Тимошенко С. П., Дж. Гудьер. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
15. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. — М.: Недра, 1983. — 280 с.
16. Громов Ю. В., Бычков Ю. Н., Кругликов В. И. Управление горным давлением при разработке мощных пологих пластов угля. — М.: Недра, 1985. — 239 с.
17. Корнев Е. С., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов методом конечных элементов // Вестн. КузГТУ. — 2013. — № 2. — С. 65–69.

Поступила в редакцию 04/II 2019

После доработки 04/II 2019

Принята к публикации 26/III 2019