

I. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ГЕОМЕХАНИКА

УДК 539.3+539.4+622.833.5+622.834

И.Ю. Смолин (доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения СО РАН, профессор Томского государственного университета)

А.В. Кузнецова (аспирантка Томского государственного университета)

П.В. Макаров (доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института физики прочности и материаловедения СО РАН, профессор Томского государственного университета)

А.А. Трубицын (доктор технических наук, профессор, генеральный директор ОАО «Научный центр ВостНИИ по безопасности работ в горной промышленности»)

Н.В. Трубицына (доктор технических наук, директор по научной работе ОАО «Научный центр ВостНИИ по безопасности работ в горной промышленности»)

С.П. Ворошилов (кандидат физико-математических наук, директор НП «Кузбасский межотраслевой центр охраны труда»)

Моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород вокруг выработки при разных скоростях подвигания забоя

Для описания различия в шагах обрушения кровли очистных горных выработок при разных скоростях подвигания забоя используется вязкопластическая модель среды и условие обрушения кровли по максимальным накопленным неупругим деформациям. Дано описание вязкопластической модели и постановка задачи, которая была решена численно методом конечных элементов. Представлены результаты модельных расчетов, описывающие скоростную чувствительность при разрушении в кровле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-05-00509) и ООО «ЦОТ Горный+».

Ключевые слова: ГОРНЫЕ ПОРОДЫ, ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, ОБРУШЕНИЕ КРОВЛИ, СКОРОСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ СРЕДА

Введение

Из практики работы угольных шахт известно, что при увеличении производительности горнодобывающего оборудования и соответствующем возрастании скорости подвигания забоя увеличиваются также и шаги обрушения кровли. При этом значения шагов первичного и последующих обрушений кровли не соответствуют показателям, рассчитанным по действующим нормативным

документам. Поэтому актуальной для обеспечения безопасности проведения подземных работ является проблема расчета напряженно-деформированного состояния горного массива, окружающего выработку полезного ископаемого, при высокопроизводительной выемке угольных пластов.

Для объяснения и описания указанной скоростной чувствительности разрушения горных пород в работе [1] предлагается использовать экспериментально установленную зависимость прочности горных пород от скорости их нагружения [2, 3]. Как известно, с увеличением скорости нагружения прочность горных пород растет. В работе [1] продемонстрировано, что такой подход позволяет при численном моделировании предсказать, насколько увеличится шаг первичного обрушения кровли при возрастании скорости подвигания забоя. Однако это не единственный способ. Например в работах [4, 5] используются эволюционные модели накопления повреждений, которые при разных скоростях подвигания забоя обеспечивают разные картины поврежденности в кровле при численном моделировании и, как следствие, позволяют также получить различные шаги обрушения кровли. Третий подход связан с учетом вязких свойств геосреды. Как показано в работах [6,7] для предела текучести пластичных материалов, природа увеличения предела текучести с ростом скорости нагружения кроется в вязких свойствах материала. За счет того, что вязкие напряжения уменьшаются на разную величину за разное время, прочностные свойства материалов при разных скоростях нагружения будут отличаться. Аналогичная ситуация имеет место и для прочностных свойств горных пород.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы продемонстрировать, что применение вязкопластических моделей позволяет описать и смоделировать численно увеличение шагов обрушения кровли очистных горных выработок при увеличении скорости подвигания очистного забоя. Для этого в работе проведено сравнение распределений напряжений и деформаций при изменении размеров горной выработки, полученных при разных скоростях подвигания забоя. Решение такой задачи выполнено методом конечных элементов в трехмерной постановке.

Метод расчета и определяющие соотношения вязкопластической среды

Для расчетов использовалась компьютерная программа Tochnog [8], которая позволяет решать широкий класс задач, в том числе и геомеханики, методом конечных элементов, а также, что важно для рассматриваемой задачи, изменять в ходе расчета геометрию расчетной области. Для моделирования реакции геоматериалов в ней имеется широкий набор определяющих соотношений материалов, включая и вязкопластические модели.

При описании процессов неупругой деформации геоматериалов во многих случаях применяется математический аппарат теории упругопластического течения [9]. При этом, не вдаваясь в подробности микроскопических механизмов неупругого поведения геоматериалов, под пластическими деформациями понимают любые необратимые деформации независимо от их природы. Условие в напряжениях для перехода от упругого поведения к пластическому задается функцией текучести $f(\sigma_{ij})$, которой в пространстве напряжений соответствует некоторая поверхность. Если это условие выполнено, то тензор скоростей пластических деформаций (или их приращений в инкрементальном подходе) определяется формулой, выражающей закон пластического течения (или закон градиентальности), как величина, пропорциональная градиенту от пластического потенциала

$g(\sigma_{ij})$, также являющегося функцией напряжений. Если функция текучести и пластический потенциал совпадают, то закон пластического течения называется ассоциированным, а в противном случае — неассоциированным.

Для описания неупругих деформаций была выбрана широко применяемая для геоматериалов усовершенствованная модель Друккера–Прагера [10], основанная на неассоциированном законе пластического течения с функцией текучести:

$$f = 3\alpha\sigma_m + \sigma - K \quad (1)$$

и пластическим потенциалом

$$g = 3\beta\sigma_m + \sigma. \quad (2)$$

Здесь α – коэффициент внутреннего трения;

β – коэффициент дилатансии;

K – сдвиговая прочность материала;

σ_m — среднее напряжение;

σ — интенсивность напряжений.

В подобных моделях часто используется также понятие угла внутреннего трения как соответствующей величины в законе Кулона. Формула, связывающая коэффициент α и угол ϕ внутреннего трения, имеет вид:

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}. \quad (3)$$

Аналогичным образом можно ввести и угол дилатансии ψ :

$$\beta = \frac{2 \sin \psi}{\sqrt{3}(3 - \sin \psi)}, \quad (4)$$

а сдвиговую прочность выразить через сцепление C , определяемое в экспериментах, по формуле:

$$K = \frac{6C \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}. \quad (5)$$

Компоненты тензора скоростей пластических деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ в соответствии с законом пластического течения определяются формулой:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (6)$$

Здесь $\dot{\lambda}$ — пластический множитель (неопределенный множитель Лагранжа), который вычисляется из условия, что напряжения находятся на поверхности текучести;

σ_{ij} – компоненты тензора напряжений.

Таким образом, величина скорости пластических деформаций определяется уровнем напряжений и пластическим множителем и не зависит от времени. Другими словами, отклик материала оказывается не чувствительным к скорости нагружения.

Для того чтобы учесть скоростную чувствительность, используются вязкопластические модели — т.е. модели пластичности с учетом влияния скорости деформации. Они часто применяют-

ся для высокоскоростных условий деформирования и нестационарных процессов. В отличие от вязкоупругих моделей влияние на напряжение в вязкопластических моделях оказывается не через упругие, а через пластические деформации. Одним из вариантов построения вязкопластических моделей является обобщение закона текучести путем замены пластического множителя на некоторую безразмерную функцию от функции текучести, умноженную на скоростной параметр. В наших расчетах была использована степенная функция:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \eta \left(\frac{f}{f^{ref}} \right)^p \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (7)$$

Здесь η – параметр текучести (величина, обратно пропорциональная вязкости);

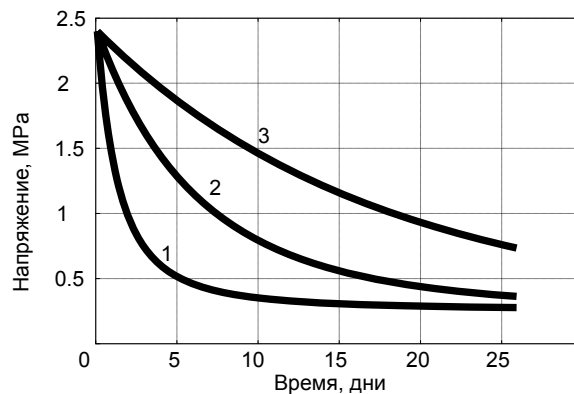
f^{ref} – исходное значение функции текучести;

p – параметр модели.

В отличие от чисто пластических моделей в этом случае напряжения могут превышать на некоторое время предел текучести и постепенно уменьшаются со временем по мере развития пластических деформаций.

Физической основой этой феноменологической модели является широко применяемый степенной закон ползучести Нортона для второй стадии ползучести (установившаяся ползучесть), который устанавливает пропорциональность скорости деформации напряжению в некоторой степени.

Скорость релаксации напряжений определяется параметрами модели. Зависимости изменения напряжений в расчетах на релаксацию при фиксированной деформации для различных параметров вязкопластической модели на примере алевролита показаны на рисунке 1.



1 – $\eta=5 \cdot 10^{-10} \text{с}^{-1}$; $p=1,5$; $f=1 \text{ МПа}$

2 – $\eta=2 \cdot 10^{-10} \text{с}^{-1}$; $p=1,2$; $f=1,5 \text{ МПа}$

3 – $\eta=1 \cdot 10^{-10} \text{с}^{-1}$; $p=1$; $f=2 \text{ МПа}$

Рисунок 1 – Релаксация напряжений при разных параметрах вязкопластической модели

Описание геометрических и физико-механических характеристик

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива вокруг выработки было проведено для модельного объекта, характерного для шахт Кузбасского региона. Размер расчетной области и краткая характеристика неоднородности горного массива по глубине представлены на рисунке 2.

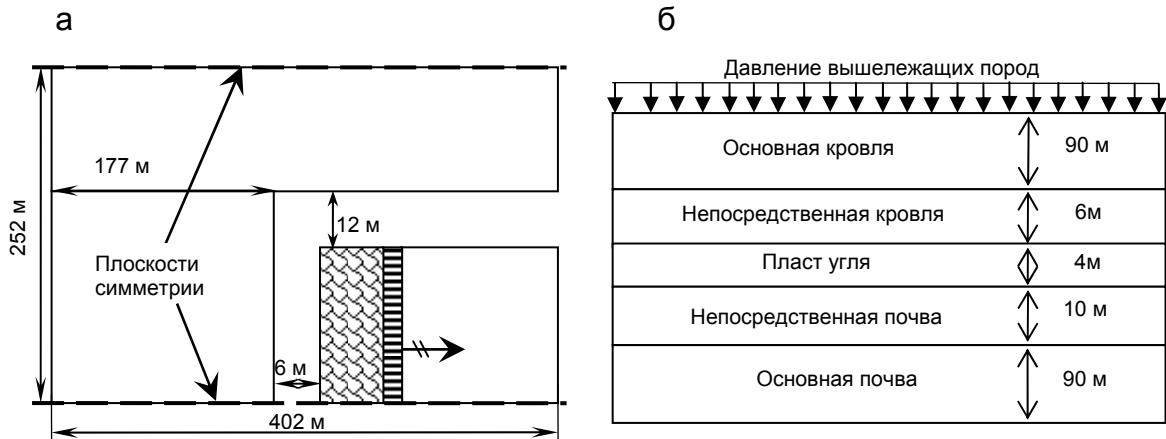


Рисунок 2 – Схема расчетной области в плоскости пласта (а) и по глубине с характеристикой вмещающих пород (б)

Расчетная схема представляет собой геометрическую модель, включающую пласт угля и слои вмещающих пород, окружающие выработку полезного ископаемого. Разделение на слои обусловлено разным составом и физико-механическими свойствами горных пород. Сверху полезного ископаемого выделяют непосредственную и основную кровли, а снизу — непосредственную и основные почвы (рисунок 2). Кроме этого, в начальный момент присутствуют подготовительные выработки в угольном пласте.

Физико-механические свойства угля и вмещающих пород, использованные в расчетах в данной работе, представлены в таблице 1. Они были выбраны на основе имеющихся в научной литературе данных [11–13]. Поскольку значений параметров выбранной вязкопластической модели для угля и вмещающих пород найти не удалось, то величина параметра текучести была выбрана из условия соответствия результатов расчетов по порядку величин с данными по шагам обрушения кровли из практики работы угольных шахт (рисунок 1), а параметр p был принят равным единице.

Таблица 1 - Физико-механические характеристики пород

Название	Основная почва	Непосредственная почва	Уголь	Непосредственная кровля	Основная кровля
Плотность, г/см ³	2,5	2,42	1,3	2,41	2,52
Модуль Юнга, ГПа	20	20	5	20	20
Коэффициент Пуассона	0,14	0,14	0,3	0,14	0,14
Сцепление, МПа	0,6	0,6	0,1	0,2	0,6
Угол внутреннего трения, град	38	38	30	38	38
Угол дилатансии, град	13	13	10	13	13
f^{ef} , МПа	6	6	1	2	6
η , с ⁻¹	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}

Граничные условия, определяющие особенности нагружения горного массива, были выбраны следующие. На верхней грани расчетной области прилагается давление вышележащих слоев пород, соответствующее заданной глубине залегания угольного пласта. Нагрузка задается также действием силы тяжести во всей области. Нижняя грань закреплена в вертикальном направлении. Боковые грани — вертикальные плоскости симметрии (запрещено смещение в горизонтальном направлении). В начальный момент времени задавалась проходческая выработка и монтажная камера, очистная выработка отсутствует. В процессе расчета в пласте угля растет в одном направлении очистная горная выработка (часть конечных элементов убирается), что обуславливает изменение геомеханической обстановки в исследуемом объеме горного массива за счет продвижения забоя (рисунок 3).

Размер расчетной области составил $402 \times 252 \times 200 \text{ м}^3$. Расчетная сетка при отсутствии горной выработки — $134 \times 42 \times 25$ элементов. Использовались прямоугольные параллелепипедные элементы. Примеры конечно-элементных аппроксимаций при разных размерах выработки показаны на рисунке 3. Каждый конечный элемент вдоль горизонтальной оси X имеет размер 3 м, поэтому минимальное расстояние, на которое может измениться размер горной выработки, также составляет 3 м.

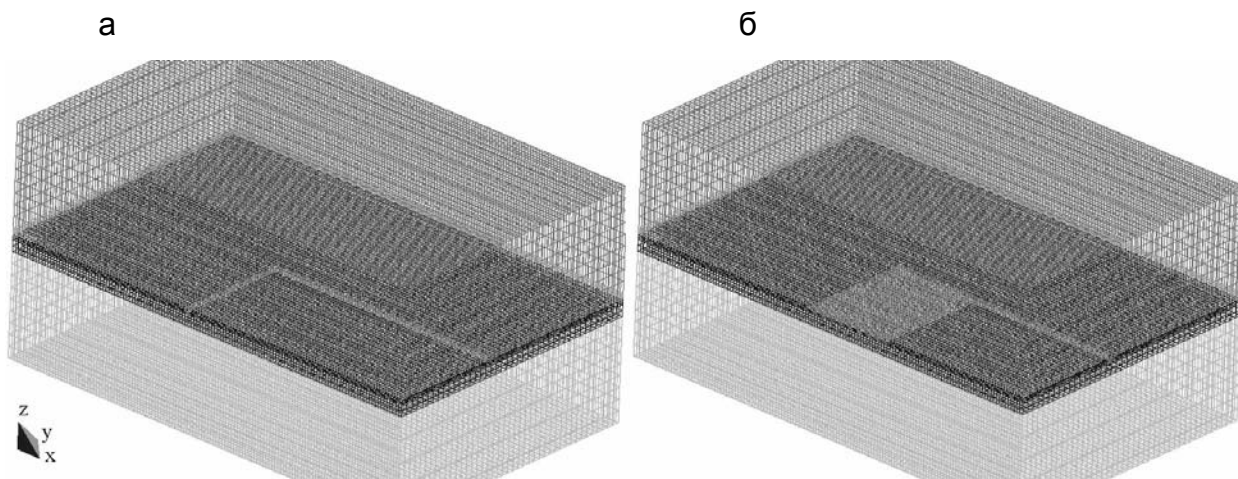


Рисунок 3 – Сетки конечных элементов в начальный момент времени (а) и при продвижении очистной горной выработки (б)

Результаты расчетов и их обсуждение

В программе Tochnog расчет ведется с явным указанием шагов по времени, т.е. хотя задача решается как квазистатическая и на каждом шаге определяется равновесное напряженно-деформированное состояние системы, но время в процессе счета отслеживается и используется при интегрировании определяющих соотношений. В расчете указывается также, за какой период времени убираются конечные элементы. Таким образом, изменяя это время, можно варьировать скорость подвигания забоя. Расчеты были проведены для трех таких скоростей: 30, 60 и 90 м/мес.

При такой постановке задачи имеется возможность оценить влияние скорости подвигания забоя на шаг первичного обрушения кровли. Первичное обрушение кровли является более опас-

ным по своим проявлениям, чем последующие обрушения, поэтому его исследование является и более важным с практической точки зрения. Для определения условия обрушения необходимо выбрать соответствующий критерий разрушения пород кровли. В работе [14] при проведении подобного типа расчетов в качестве критерия обрушения пород кровли предложено условие, когда выбранный критерий прочности в напряжениях достигается в большей части конечных элементов, покрывающих кровлю. Однако в указанной работе не учитывались вязкие свойства среды. В нашем случае более подходящими следует признать критерии, основанные на развитии неупругих деформаций со временем или работе напряжений на таких деформациях.

Для анализа сравнивались распределения интенсивности пластических деформаций, рассчитанные по формуле $\varepsilon^P = \sqrt{0.5e_{ij}e_{ij}}$, где e_{ij} – компоненты девиатора тензора пластических деформаций. Чтобы представить это сравнение более наглядно в виде графиков, указанные величины были взяты вдоль прямой линии в непосредственной кровле, расположение которой показано на рисунке 4.

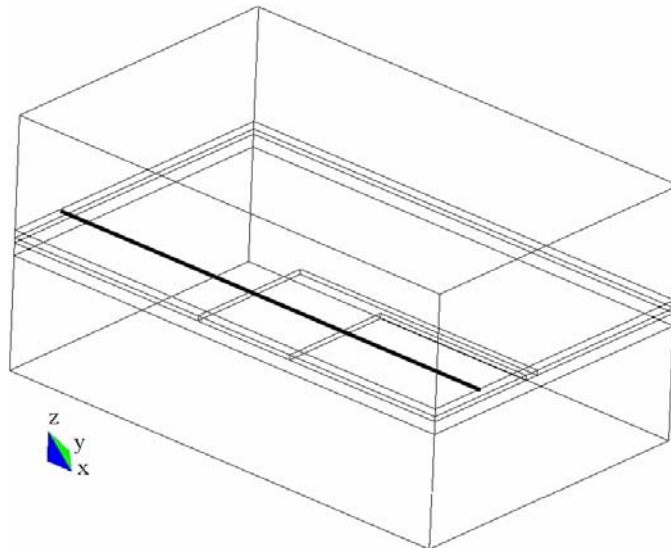


Рисунок 4 – Положение линии, вдоль которой сравнивались величины интенсивностей пластических деформаций

Сравнивая результаты проведенных расчетов, представленные на рисунке 5, видно, что учет вязких свойств геосреды при продвижении горной выработки на одно и то же расстояние с разной скоростью приводит к накоплению разных значений неупругих деформаций в непосредственной кровле. Если сопоставить данные расчетов и практики работы угольных шахт, то можно определить критическое значение накопленных неупругих деформаций. Например, если при скорости подвигания забоя 30 м/мес шаг первичного обрушения равен 25...30 м, а при скорости 60 м/мес — 45...50 м, то в качестве критического значения накопленных деформаций можно принять значение порядка $10^{-6}\%$.

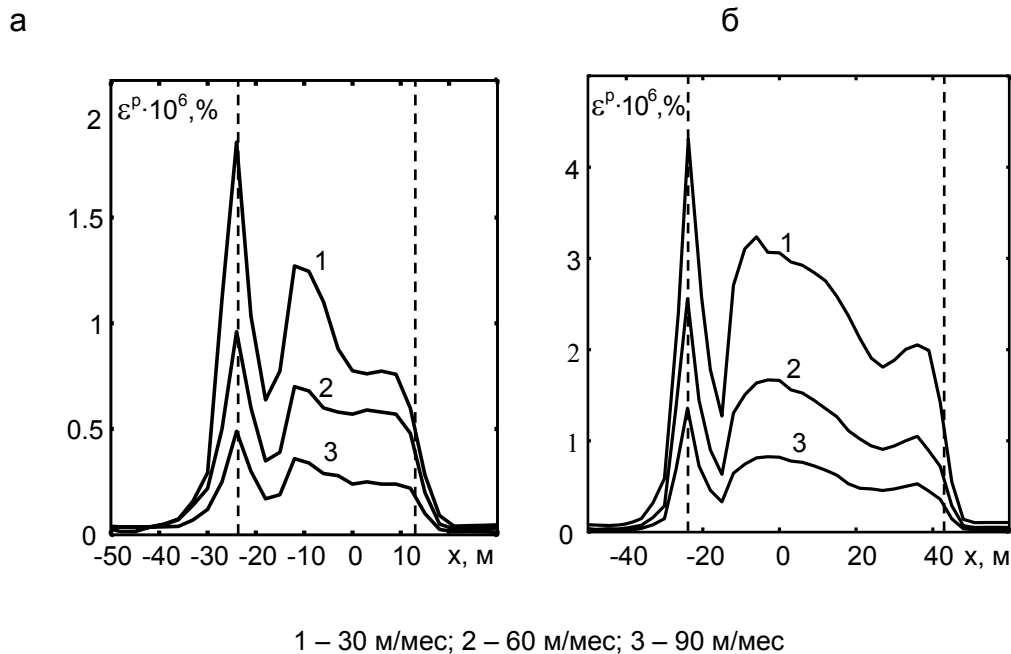


Рисунок 5 – Распределение интенсивности пластических деформаций в непосредственной кровле над выработкой длиной 36 м (а) и 66 м (б) при разных скоростях продвижения забоя (границы выработки показаны пунктирными вертикальными линиями)

Полученное в расчетах соотношение между шагами начального обрушения кровли при скоростях продвижения забоя 30 и 60 м/мес хорошо согласуется с данными, приведенными для различных шахт Донбасса [15], и близко к данным для шахт Кузбасса согласно имеющимся у авторов неопубликованным данным.

Заключение

Проведенные расчеты с применением выбранной модели вязкопластической среды и модельных параметров подтвердили возможность описать увеличение шага обрушения кровли при увеличении скорости продвижения забоя в угольных шахтах. Предложенный алгоритм оценки начального шага обрушения непосредственной кровли после привязки параметров вязкопластической модели к данным экспериментального исследования вязких свойств вмещающих пород и уточнения критерия обрушения кровли может быть использован в реальных условиях шахт Кузбасского региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Иванов, А.С. Численное моделирование влияния скорости обнажения горных пород на механические процессы вблизи сопряжения очистной и подготовительной выработки / А.С. Иванов, Е.А. Сдвижкова, Д.В. Бабец // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2009». – Т. 3. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2009. – С. 37–44.
- 2 Мансуров, В.А. Поведение горных пород при различных скоростях нагружения / В.А. Мансуров, А.Г. Протосеня. – Фрунзе: Илим, 1982. – 88 с.
- 3 Красько, Н.И. Исследование зависимости прочности пород на растяжение от времени их нагружения / Н.И. Красько // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Гірничо-геологічна». – 2002. – Вип. 54. – С. 154–159.
- 4 Макаров, П.В. Моделирование обрушения кровли над выработанным пространством / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Е.П. Евтушенко, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 44–50.

5 Макаров, П.В. Сценарии эволюции горного массива над выработкой / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Е.П. Евтушенко, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 1. – С. 75–82.

6 Макаров, П.В. Исследование вязких и релаксационных свойств металлов в ударных волнах методами математического моделирования / П.В. Макаров, Т.В. Жукова, Т.М. Платова, Е.Г. Скороспелова, В.А. Скрипняк, Г.Н. Фондеркина // Физика горения и взрыва. – 1987. – № 1. – С. 29–34.

7 Макаров, П.В. Сдвиговая прочность и вязкость металлов в ударных волнах / П.В. Макаров // Ударные волны и экстремальные состояния вещества / под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова. – М.: Наука, 2000. – С. 219–255.

8 Руководство пользователя TOCHNOG [Электронный ресурс], 2004. – Режим доступа: <http://tochnog.sourceforge.net>, свободный.

9 Стефанов, Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов / Ю.П. Стефанов // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т.8. – №3. – С. 129–142.

10 Друккер, Д. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование / Д. Друккер, В. Прагер // Механика. Новое в зарубежной науке. – Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. – М.: Мир, 1975. – С. 166–177.

11 Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

12 Каталог механических свойств горных пород при широкой вариации видов напряженного состояния и скорости деформирования / А.Н. Ставрогин, Е.Ю. Семенова, В.Ф. Авксентьева, Е.Д. Певзнер, А.Т. Карманский, Е.В. Лодус, О.А. Ширкес. – Ленинград: ВНИМИ, 1976. – 171 с.

13 Механические и абразивные свойства горных пород / под общей ред. Л.А. Шрейнера. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 202с.

14 Хозяйкина, Н.В. Закономерности изменения предельного напряженного состояния в сложноструктурной кровле лав пологопадающих угольных пластов: дис... канд. техн. наук: 05.15.09/ Наталья Владимировна Хозяйкина. – Днепропетровск, 2004. – 144 с.

15 Иванов, О.С. Аналіз факторів впливу на крок обвалення порід покрівлі лави в умовах високого ступеню метаморфізму порід / О.С. Иванов // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – 2009. – Вип.10(151). – С. 148–151.

MODELLING OF MINE ROCK STRESSED-DEFORMED CONDITION AROUND MINE OPENING AT DIFFERENT SPEEDS OF FACE ADVANCE

I.Yu. Smolin, A.V. Kuznetsova, P.V. Makarov, A.A. Trubitsyn, N.V. Trubitsyna, S.P. Voroshilov

In order to describe differences in the steps of roof falling of coal extraction mine openings at different speeds of the face advance visco-plastic environment model and condition of roof fall on maximal accumulated non-elastic deformations is used. Description of visco-plastic model is given and the task is set which was solved numerically with the method of finite element. Results of model calculations are presented which describe speed sensitivity at destruction in the roof.

The work is fulfilled with RFFI support (grant No. 10-05-00509) and ООО "COT Gorny+"

Key words: MINE ROCK, MINE OPENING, STRESSED-DEFORMED CONDITION, ROOF FALL, SPEED SENSITIVITY, VISCO-PLASTIC ENVIRONMENT

Смолин Игорь Юрьевич

e-mail: smolin@ispms.tsc.ru

Кузнецова Анастасия Викторовна

e-mail: kuznetsovaa@sibmail.com

Макаров Павел Васильевич

e-mail: pvm@ispms.tsc.ru

Трубицын Анатолий Александрович

e-mail: 340670@kemtcl.ru

Трубицына Нэля Вадимовна

e-mail: 340670@kemtcl.ru

Ворошилов Сергей Петрович

kuzbassCOT@mail.ru