

Численный анализ обрушения кровли при разных скоростях подвигания забоя*

И.Ю. СМОЛИН

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Томский государственный университет
634021, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4
e-mail: smolin@ispms.tsc.ru*

А.В. КУЗНЕЦОВА

*Томский государственный университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36
e-mail: kuznetsovaa@sibmail.com*

Чтобы описать различие в шагах обрушения кровли очистных горных выработок при разных скоростях подвигания забоя предложено использовать вязкопластическую модель среды и критерий обрушения кровли по максимальным накопленным неупругим деформациям. Дано описание вязкопластической модели и постановки задачи. Представлены результаты модельных расчетов, выполненных методом конечных элементов и описывающие скоростную чувствительность при обрушении кровли.

1. Введение

Практика работы угольных шахт свидетельствует, что при возрастании скорости подвигания забоя увеличиваются также и шаги обрушения кровли. При этом шаги первичного и последующих обрушений кровли не соответствуют показателям, рассчитанным по действующим нормативным документам. Поэтому для безопасного проведения подземных горных работ важным является адекватный расчет напряженно-деформированного состояния в окружающем выработку полезного ископаемого горном массиве 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. 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 [2, 3] 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. За

* Данная работа выполнена в рамках проекта VII.64.1.8 фундаментальных исследований СО РАН на 2010-2012 гг. и при поддержке РФФИ, грант № 10-05-00509.

счет того, что вязкие напряжения уменьшаются на разную величину за разное время, прочностные свойства материалов при разных скоростях нагружения будут отличаться.

Цель настоящей работы — продемонстрировать применимость вязкопластической модели для численного моделирования роста шагов обрушения кровли очистных горных выработок при увеличении скорости подвигания забоя. Для этого в работе проведено сравнение рассчитанных распределений накопленных неупругих деформаций в кровле горной выработки, полученных при разных скоростях подвигания забоя.

2. Метод расчета и определяющие соотношения вязкопластической среды

Для расчетов использовалась компьютерная программа Tochnog [4], 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. 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 $f(\sigma_{ij})$. Если это условие выполнено, то тензор скоростей пластических деформаций определяется формулой, выражающей закон пластического течения, как величина, пропорциональная градиенту от пластического потенциала $g(\sigma_{ij})$. Если функция текучести и пластический потенциал совпадают, то закон пластического течения называется ассоциированным, а если нет — неассоциированным.

Для описания неупругих деформаций была выбрана широко применяемая для геоматериалов усовершенствованная модель Друккера–Прагера, основанная на неассоциированном законе пластического течения с функцией текучести $f(\sigma_{ij}) = 3\alpha\sigma_m + \sigma - K$ и пластическим потенциалом $g(\sigma_{ij}) = 3\beta\sigma_m + \sigma$. Здесь α — коэффициент внутреннего трения, β — коэффициент дилатансии, K — сдвиговая прочность материала, σ_m — среднее напряжение; σ — интенсивность напряжений.

При использовании подобных моделей часто используется также понятие угла внутреннего трения, как соответствующей величины в законе Кулона. Формула, связывающая коэффициент α и угол ϕ внутреннего трения, имеет вид $\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3(3-\sin\phi)}}$. Аналогичным образом можно ввести и угол дилатансии ψ , а сдвиговую прочность выразить через сцепление C , определяемое в экспериментах, по формуле $K = \frac{6C\cos\phi}{\sqrt{3(3-\sin\phi)}}$.

Компоненты тензора скоростей пластических деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ в соответствии с законом пластического течения определяются формулой $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$. Здесь $\dot{\lambda}$ — пластический множитель, 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. Они часто приме-

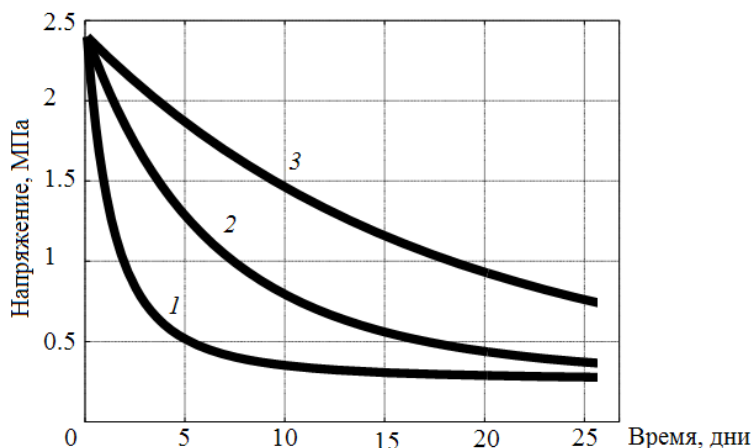


Рис. 1. Релаксация напряжений при разных параметрах вязкопластической модели. 1 — $\eta = 5 \times 10^{-10} \text{ с}^{-1}$, $p = 1.5$, $f = 1 \text{ МПа}$; 2 — $\eta = 2 \times 10^{-10} \text{ с}^{-1}$, $p = 1.2$, $f = 1.5 \text{ МПа}$; 3 — $\eta = 1 \times 10^{-10} \text{ с}^{-1}$, $p = 1$, $f = 2 \text{ МПа}$

няются для высокоскоростных условий деформирования и нестационарных процессов. 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. Нами была использована степенная функция $\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \eta \left(\frac{f}{f^{ref}} \right)^p \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$. Здесь η — параметр текучести, 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, который устанавливает пропорциональность скорости деформации напряжению в некоторой степени.

Скорость релаксации напряжений определяется параметрами модели. Зависимости изменения напряжений от времени при фиксированной деформации для различных параметров вязкопластической модели показаны на рисунке 1.

3. 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. 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.

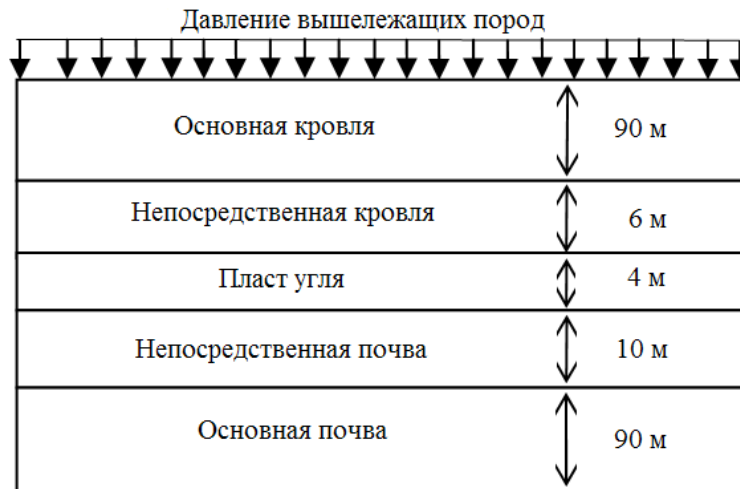


Рис. 2. Схема расчетной области по глубине с характеристикой вмещающих пород

Т а б л и ц а 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^{ref} , МПа	6	6	1	2	6
η , с ⁻¹	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}

Физико-механические свойства угля и вмещающих пород, использованные в расчетах, представлены в таблице 1. Они были выбраны на основе имеющихся в научной литературе данных [5]. Поскольку значений параметров выбранной вязкопластической модели для угля и вмещающих пород найти не удалось, то величина параметра текучести была выбрана из условия соответствия результатов расчётов по порядку величин с данными по шагам обрушения кровли из практики работы угольных шахт (рисунок 1), а параметра p был принят равным единице.

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 процессе расчета в пласте угля образуется и 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.

Размер расчетной области в двухмерных расчетах составил $400 \times 200 \text{ м}^2$. Расчетная сетка при отсутствии горной выработки — 134×200 элементов. Использовались четырёхугольные элементы. 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.

4. Результаты расчётов и их обсуждение

В программе *Тоchnog* расчет ведется с явным указанием шагов по времени. В расчете указывается также, за какой период времени убираются конечные элементы. Таким образом, изменяя это время можно варьировать скорость подвигания забоя. Расчёты были проведены для трёх таких скоростей: 30, 60 и 90 м/месяц.

При такой постановке задачи имеется возможность оценить влияние скорости подвигания забоя на шаг первичного обрушения кровли. Первичное обрушение кровли является более опасным 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. При использовании вязкопластической модели удобно использовать критерий, основанный на развитии неупругих деформаций со временем.

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 одной и той же прямой линии в непосредственной кровле.

Сравнивая результаты проведенных расчетов, представленные на рисунке 3, 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/месяц шаг первичного обрушения равен 25–30 м, а при скорости 60 м/месяц — 45–50 м, то в качестве критического значения накопленных деформаций можно принять значение порядка $10^{-6}\%$.

Полученное в расчетах соотношение между шагами начального обрушения кровли при скоростях подвигания забоя 30 и 60 м/месяц хорошо согласуется с данными, приведенными для различных шахт Донбасса [6] и близко к данным для шахт Кузбасса, согласно имеющимся у авторов неопубликованным данным.

5. Заключение

Проведенные расчеты с применением выбранной модели вязкопластической среды и модельных параметров подтвердили возможность описать увеличение шага обрушения кровли при увеличении скорости подвигания забоя в угольных шахтах. Предложенный алгоритм оценки начального шага обрушения непосредственной кровли после привяз-

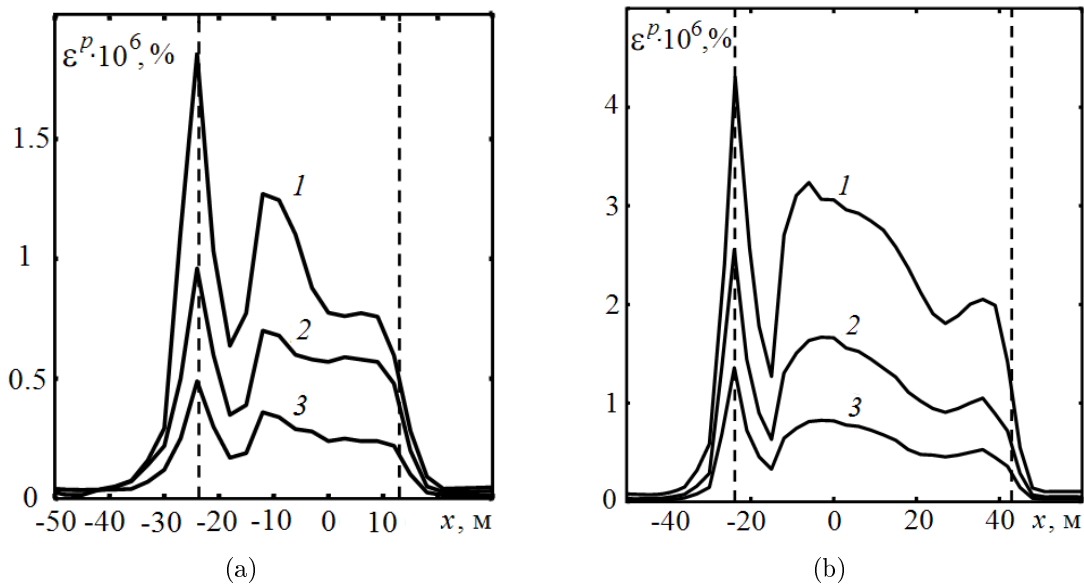


Рис. 3. Распределение интенсивности пластических деформаций в непосредственной кровле над выработкой длиной 36 м (а) и 66 м (б) при разных скоростях подвигания забоя: 1 — 30 м/месяц; 2 — 60 м/месяц; 3 — 90 м/месяц. Границы выработки показаны пунктирными вертикальными линиями

ки 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.

Список литературы

- [1] Иванов А.С., Сдвижкова Е.А., Бабец Д.В. Численное моделирование влияния скорости обнажения горных пород на механические процессы вблизи сопряжения очистной и подготовительной выработки // Матеріали міжнародної конференції "Форум гірників – 2009". Т. 3. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2009. С. 37–44.
- [2] Макаров П.В., Смолин И.Ю., Евтушенко Е.П., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П. Моделирование обрушения кровли над выработанным пространством // Физ. мезомех. 2008. Т. 11. № 1. С. 44–50.
- [3] Макаров П.В., Смолин И.Ю., Евтушенко Е.П., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П. Сценарии эволюции горного массива над выработкой // Физ. мезомех. 2009. Т. 12. № 1. С. 75–82.
- [4] Руководство пользователя TOCHNOG [Электронный ресурс], 2004. Режим доступа: <http://tochnog.sourceforge.net>, свободный.
- [5] 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.
- [6] Иванов О.С. Аналіз факторів впливу на крок обвалення порід покрівлі лави в умовах високого ступеню метаморфізму порід // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». 2009. Вип. 10(151). С. 148–151.