

*Алексей Иванов**, *Елена Сдвижкова**, *Александр Шашенко***

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ НА ПРОЧНОСТЬ ПОРОД И УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫРАБОТКИ

1. Состояние вопроса

Прогноз поведения горных пород при изменении темпов очистных работ является необходимым элементом для разработки мероприятий по охране выработок и выбору средств крепления. В настоящее время нет единого мнения о том каково влияние скорости проведения выработок на механические процессы, которые происходят в породном массиве. Гипотетически можно предположить, что при быстром обнажении пород в массиве происходят те же процессы, что и в образце горных пород при быстром приложении нагрузки на испытательном прессе. Поэтому многими исследовательскими коллективами изучался вопрос о влиянии скорости нагружения на процесс разрушения образцов в лабораторных условиях [1]. В данной работе выполнено обобщение известных результатов и предложена методика учета скорости проведения выработок при моделировании геомеханических процессов.

2. Влияние скорости нагружения на прочность породных образцов

В таблице 1 приведены основные результаты, полученные исследователями в разные годы [1]. В Украине представительный объем испытаний на сжатие образцов песчаника, алевролита, аргиллита, угля выполнен сотрудниками ИГТМ НАН Украины [2].

Большинство результатов сводится к следующему: в диапазоне скоростей 10^{-4} – 10^3 кг/см²·с для горных пород устойчиво проявляется тенденция к увеличению прочности с ростом скорости нагружения. В большинстве случаев это увеличение

* Кафедра высшей математики, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

** Кафедра строительства и геомеханики, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

ТАБЛИЦА 1

Результаты исследований прочности в зависимости от скорости нагружения

Исследователи	Скорость нагружения, кг/см ² ·с	Материал образца	Полученная зависимость и/или сделанные выводы
М.Ф. Кунтыш	10 ⁻³ –10 ³	известняк	$\frac{\sigma_n}{\sigma_1} = 0,005(\log V_n)^2 + 0,075 \log V_n + 1$ где: σ_n — сопротивление сжатию при скорости нагружения $V_n \neq 1$ кг/см ² ·с, σ_1 — сопротивление сжатию при скорости нагружения, $V_1 = 1$ кг/см ² ·с
Р. Хоупер	10 ¹ –10 ⁴	гранит	$\sigma_n = a + b \log \frac{V_i}{V_0}$ где: a и b — постоянные, с размерностью напряжений, V_n — скорость нагружения образца, $V_1 = 1$ кг/см ² ·с.
А.И. Берон	10 ⁻⁴ –10 ³	известняк, песчаник, габбро	$\sigma_n = a + b \cdot \lg V_i$ Отмечается более интенсивное влияние для слабых пород.
Фон М. Вавро и Дж. Микешка	два интервала: 1) < 10,0 2) > 10,0	глинистый сланец	С ростом скорости нагружения растет прочность и падает размер критических деформаций, отмечается изменение модуля упругости
В.А. Мансуров	0–900	известняк, песчаник, мрамор	При увеличении скорости нагружения растет прочность образца. Выявлен диапазон скоростей, где отмечается резкое падение прочности

описывается логарифмической зависимостью. Установленную закономерность можно объяснить с точки зрения статистической теории прочности.

3. Изменения прочности горных пород с точки зрения статистической теории прочности

В [2] обоснована вероятностная модель разрушения образца, как процесс последовательного разрыва связей. Показано, что если при скорости нагружения v_0 вероятность разрушения равна $F(\sigma)$, то при увеличении скорости в n раз вероятность разрушения определяется как вероятность произведения n независимых событий, то есть составляет $F^n(\sigma)$, где $n = v_n/v_0$. Перейдем теперь к описанию функции $F(\sigma)$, где σ — максимальная прочность из всех возможных значений прочности связей, то есть — максимальное значение в выборке. Известно [3], что, если элементы выборки подчиняются закону распределения, которое имеет вид экспоненты в области наибольших значений и не ограничено справа (такими являются экспоненциальное, нормальное, гамма-распределение), то максимальные значения в выборке описываются законом Гумбеля с функцией вероятности:

$$F(\sigma) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{\sigma - \mu}{\delta}\right)\right) \quad (1)$$

Здесь μ , δ — параметры формы и масштаба, которые определяются через среднюю выборочную $\bar{\sigma}$ и стандарт отклонения S : $\mu = \bar{\sigma} - 0,577 \delta$, $\delta = 1,288 S$.

Тогда:

$$F^n(\sigma) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{\sigma - (\mu + \delta \ln n)}{\delta}\right)\right) \quad (2)$$

Функция $F^n(\sigma)$ имеет тот же самый тип, что и $F(\sigma)$, отличается только значениями входящих в нее параметров, которые соответственно равны:

$$\mu_n = \mu + \delta \ln(n) \quad (3)$$

$$\delta_n = \delta \quad (4)$$

С учетом, что $\mu = \bar{\sigma} - 0,577 \delta$ и $\delta_n = \delta$ получено соотношение:

$$\sigma_n = \bar{\sigma} + 1,288 S \ln \frac{v_n}{v_0} \quad (5)$$

Таким образом, решение вероятностно-статистической задачи также приводит к логарифмической зависимости прочности от скорости нагружения, причем параметры уравнения реально могут быть получены путем стандартной обработки статистических данных. Уравнение (5) можно привести к виду:

$$\frac{\sigma_n}{\sigma} = 1 + 1,288 \eta \ln \frac{v_n}{v_0} \quad (6)$$

где $\eta = S/\sigma$ — относительная вариация прочности. Как видно из графика (рис. 1), увеличение скорости нагружения существенно (более чем в 2 раза) увеличивает прочность тех пород, для которых характерен значительный ($> 0,3$) статистический разброс значений прочности относительно среднего, т.е. для структурно неоднородной породной среды.

При очистной выемке угля скорость обнажения горных пород, а, следовательно, и скорость перераспределения напряжений в породном массиве сопоставима со скоростью нагружения лабораторных образцов на испытательном прессе. Условно выделенный бесконечно малый структурный элемент массива испытывает нагрузку от сил горного давления, его сопротивление подобно сопротивлению породного образца зависит от скорости нагружения.

При этом, скорость приложения нагрузки в массиве сопоставима со скоростью нагружения лабораторных образцов. Уравнение (6) дает возможность корректировать

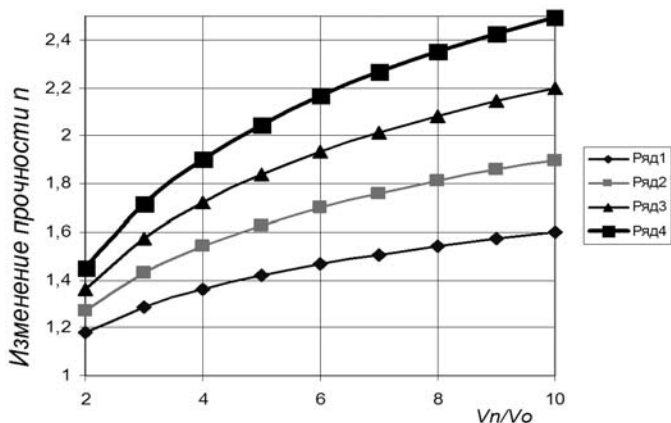


Рис. 1. Изменение прочности пород в зависимости от скорости приложения нагрузки: ряд 1 — $\eta = 0,2$; ряд 2 — $\eta = 0,3$; ряд 3 — $\eta = 0,4$; ряд 4 — $\eta = 0,5$

предельное значение прочности, полученное лабораторным путем, в соответствии с реальными условиями добычи угля и охраны выработок.

4. Критерий прочности пород с учетом скорости приложения нагрузки

Зона разрушения в кровле и почве пласта может быть определена как совокупность точек, в которых выполняется соотношение:

$$\sigma_e \geq R_c \left(1 + 1,288\eta \ln \frac{V_n}{V_0} \right) \quad (7)$$

где σ_e — эквивалентное напряжение, определяемое в соответствии с выбранной теорией прочности. В частности, сложное напряженное состояние может быть сведено к эквивалентному одноосному напряжению на основе теории прочности П.П.Баландина [4]:

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{2\psi} + \frac{\sqrt{(\psi - 1)^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 4\psi[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}}{2\psi} \quad (7)$$

где:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения,

R_p, R_c — пределы прочности на одноосное растяжение и сжатие соответственно,

$\psi = R_p/R_c$ — показатель хрупкости материала.

Условия (7) и (8) отражают реальную динамику образования полостей в массиве пород.

5. Численное моделирование НДС породного массива при различных скоростях очистного забоя

Влияние скорости подвигания очистного забоя на состояние пород кровли лавы проанализировано для условий шахты «Шахтерская Глубокая» ГП «ШахтерскАнтрацит». Шахта разрабатывает пласт «Фоминский» (h_8). Непосредственная и основная кровля представлена сланцем глинистым, песчано-глинистым, а также песчаным. Добыча угля производится в комплексно-механизированных лавах. Скорость подвигания очистного забоя составляет 22–25 метров в месяц. Глубина ведения работ на рассматриваемом участке составляет 1386 метров. Охрана подготовительных выработок осуществляется целиками шириной 10 м.

Методом конечных элементов моделировалось трехмерное напряженно-деформированное состояние (НДС) области, включающей очистную и подготовительную выработки (рис. 2).

Целью численного моделирования являлось определение геомеханической ситуации, при которой происходит первичное обрушение кровли лавы позади очистного забоя. Имитировался пошаговый отход лавы от разрезной печи на расстоянии 10, 20, 30 м с целью определить критический размер выработанного пространства, при котором произойдет первичное обрушение. На первом этапе расчетов предел прочности на сжатие принимался равным среднему выборочному R_c , определенному при стандартных испытаниях образцов пород на одноосное сжатие. С учетом коэффициента структурного ослабления (для данных условий он равен 0,5) прочность пород основной кровли составляет 34 МПа.

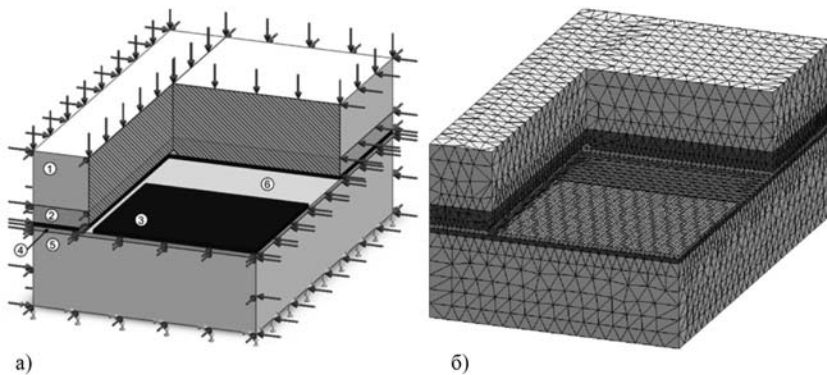


Рис. 2. Расчетная схема сопряжения подготовительной выработки и лавы с разрезом в зоне ведения очистных работ и конечноэлементная аппроксимация исследуемой области:

- 1 — основная кровля, 2 — непосредственная кровля, 3 — пласт угля,
4 — непосредственная почва, 5 — основная почва, 6 — выработанное пространство

Анализировалось распределение компонентов тензора напряжений в различных сечениях лавы, находящихся в различных условиях нагружения вследствие влияния подготовительной выработки. Наиболее характерным с точки зрения проявления пространственного эффекта является сечение лавы плоскостью, перпендикулярной линии забоя (параллельной оси подготовительной выработки), отстоящей примерно на 2 метра от целика. На рис. 3 показано распределение горизонтальных нормальных напряжений в этом сечении при размере выработанного пространства $a = 30$ м. В кровле выработки явно видна зона растягивающих напряжений, достигающая в центре выработки высоты 4 м по нормали к пласту.

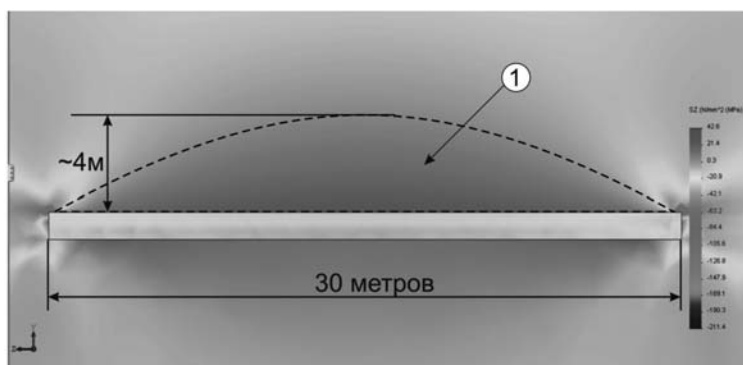


Рис. 3. Распределение горизонтальных напряжений вокруг очистной выработки при ширине выработанного пространства 30 м. 1 — зона растягивающих горизонтальных напряжений в кровле выработки

На рис. 4 точками показаны элементы, в которых выполняется условие (7). Видно, что область разрушения при данном размере выработанного пространства имеет форму свода, почти совпадающую с областью растягивающих напряжений. Область разрушения охватывает практически полностью основную кровлю.

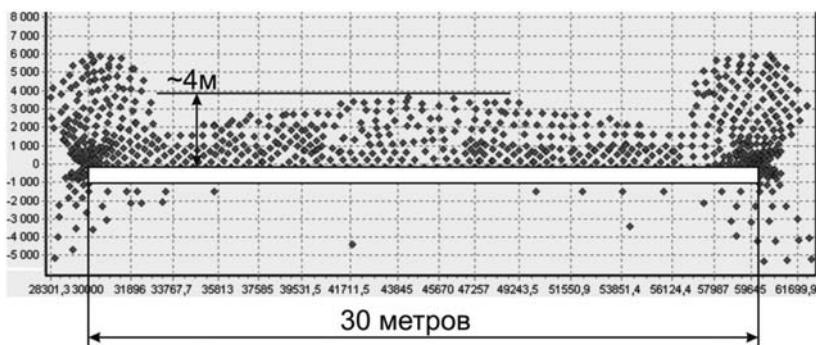


Рис. 4. Область разрушения в кровле очистной выработки при существующих темпах подвигания очистного забоя (22–25 м в месяц)

Такая ситуация рассматривается как критическая, соответствующая моменту обрушения кровли, когда вес пород в пределах зоны разрушения превосходит силы сцепления с массивом. Кроме того, расчеты на основе данной трехмерной численной модели позволили зафиксировать области разрушения над торцевыми участками выработки, высотой до 6 метров. Разрушение краевых участков создают дополнительные условия для обрушения пород в выработанное пространство. Результаты численного моделирования подтверждаются данными о величине шага обрушения на шахте «Шахтерская-Глубокая» по пласту h8, в соответствии с которой шаг первичного обрушения также составляет 28–30 м.

Современные условия требуют более эффективной работы добывающих предприятий, а современное оборудование проектируется с учетом скоростного режима добычи. Определим возможные изменения геомеханической ситуации при увеличении темпов очистных работ в условиях шахты «Шахтерская-Глубокая». Увеличение скорости обнажения пород повлечет согласно (6) изменение их прочности. Например, при увеличении скорости работы добычного оборудования в 3 раза прочность пород в соответствии с (6) увеличится в 1,5–1,7 раз, т.е. до значения $R_n = 51–58$ МПа. При таком значении прочности размер выработанного пространства $a = 30$ м уже не является критическим. Зона разрушения охватывает только часть основной кровли и вес пород, заключенный в этой зоне недостаточен для преодоления сил сцепления (рис. 5).

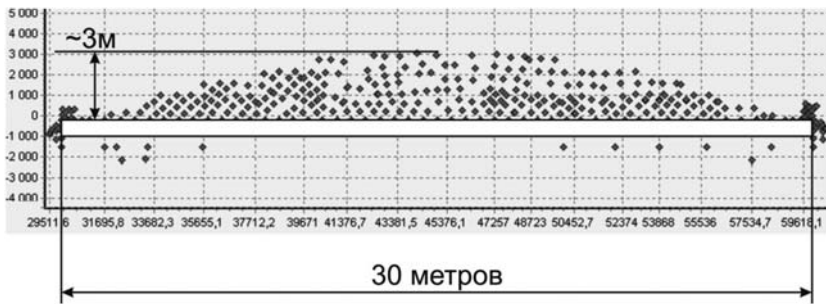


Рис. 5. Распределение разрушенных элементов в кровле очистной выработки при увеличении скорости обнажения пород (подвигание очистного забоя 60 м в месяц)

В торцевых частях выработки не наблюдается существенных зон разрушения, что также снижает возможность обрушения. Пошаговым моделированием увеличения выработанного пространства позади лавы было установлено, что критическая ситуация при данной скорости обнажения создается при размере выработанного пространства 40–45 м.

Таким образом, предложенный алгоритм может быть использован для моделирования увеличения скорости обнажения при оценке геомеханической ситуации вблизи очистной и подготовительной выработок.

Безусловно, зависимость (7) отражает только лишь стохастическую природу перераспределения прочности связей на уровне кристаллической решетки материала.

В реальности на геомеханических процессы в породном массиве оказывает влияние бесчисленное множество факторов. Выделить среди них влияние скорости обнажения пород очень сложно. Можно только наблюдать результат этого влияния *in situ*, накапливая и обобщая статистические данные.

Авторами проанализированы данные о первичных обрушениях кровли очистных выработок на шахтах ГП «ШахтерскАнтрацит» [4] при различных скоростях подвигания очистного забоя. Данные имеют значительный разброс, однако на корреляционном поле можно выделить линию тренда, которая с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,464$ описывается логарифмической зависимостью: $a = 0,224 \ln V + 6,888$. Слабая корреляционная зависимость отражает упомянутое выше множество различных влияющих факторов, однако общая тенденция указывает, что для данной группы шахт увеличение скорости очистных работ обуславливает увеличение шага первичного (генерального) обрушения кровли лавы. Увеличение критического размера выработанного пространства а связано с изменением прочности пород. На это указывает общий характер зависимостей (6) и (7).

6. Выводы

Увеличение темпов очистных работ в угольных шахтах обуславливает увеличение скорости обнажения пород, что в свою очередь означает увеличение скорости перераспределения напряжений в структурных элементах породного массива вблизи обнажения. Увеличение скорости перераспределения напряжений в породах вызывает их упрочнение в зависимости от структурных особенностей пород. Предложена методика моделирования НДС породного массива с учетом увеличения скорости обнажения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Mansurov V.A.*: Povedenie gornyh porod pri razlichnyh skorostjah nagruzenija. Frunzev Izdatel'stvo, Ilim, 1982. s. 84
- [2] *Skipochka S.I., Usachenko B.M., Kuklin V.Ju.*: Elementy geomehaniki porodnogo massiva pri vysokih skorostjah podviganiya lav. Dnepropetrovsk, ChP Lira LTD, 2006. s. 248
- [3] *Han G., Shapiro S.*: Statisticheskie modeli v inzhenernyh zadachah. Mir, 1969. s. 388
- [4] *Shashenko A.N., Sdvyzhkova E.A., Gapeev S.N.*: Deformiruemost' i prochnost' massivov gornyh porod: Monografija. Nacional'nyj gornyj universitet, 2008. s. 224
- [5] *Ivanov O.S.*: Analiz faktoriv vplyvu na krok obvalennja porid pokrivlji lavy v umovah vysokogo stupenju metamorfizmu porid. Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universytetu. Serija „Girnycho-geologichna“ Redkol.: Bashkov Je. O. ta inshi., Vypusk 10 (151), 2009. s. 148–152