УДК 622.011.43 + 519.2

Ю. И. Кияшко, С. К. Мещанинов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОБОСНОВАНИЮ СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНОГО ГЕОКОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЛАВ

Представлені результати аналітичних досліджень зміни кількості структурних зв'язків у гірських породах по ходу їхнього руйнування. Запропоновано ймовірносно-статистичну модель для аналізу деформування і руйнування гірських порід. Показано, що поточний контроль фізичних параметрів, змінення яких кореллує зі збитком кількості структурних зв'язків у гірських породах, може бути використаний для обгрунтування структури і основних параметрів локальній системи геоконтроля безпеки праці у високонавантажених лавах.

THE USING OF PROBABILITY-STATISTICAL APPROACH TO FOUNDATION STRUCTURE THE BASIC PARAMETERS OF LOCAL GEOCONTROL SYSTEMS OF SAFETY HIGH-LOADED WALLS

There are presented results of analytical researches the changings quantity of structural links in rocks during its destruction. There're proposed the probability-statistical model for analysis of rock's deforming and destruction. It's showed, that current control of physical parameters, its changing correlate with decreasing of quantity of structural links in rocs may be used for foundation the structure and basic parameters of local geocontrol systems of safety working high-loaded walls.

В настоящее время одним из актуальных направлений развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является научное обоснование создания высоконагруженных лав (ВЛ) для повышения угледобычи в Украине. Строительство новых шахт связано со значительными затратами. В связи с этим необходимо совершенствование структуры уже существующих шахт и улучшение условий их работы. Эксплуатация ВЛ предполагает существенное повышение добычи угля, что влечет за собой увеличение газовыделения в выработанное пространство ВЛ и интенсивное опускание кровли. Таким образом, связанная с работой ВЛ интенсификация всех процессов, обуславливает, в свою очередь, и усиление необходимости контроля всех технологических и геомеханических процессов. На региональном уровне реализовать такой контроль, в особенности в виде целостной контролирующей системы пока не представляется возможным. В связи с этим, наиболее целесообразным представляется создание локальной геоконтролирующей системы для безопасного обслуживания ВЛ.

Одним из общепризнанных научных направлений повышения безопасности труда горнорабочих является создание дистанционно управляемых и частично автоматизированных машин, оборудования и механизмов для ведения горных работ. Такие человеко-машинные системы способны обеспечить высокие уровни безопасности, надежность и производительность труда. Для отечественных шахт систем и средств безопасности труда горнорабочих по фактору «состояния горного массива», включающих средства контроля и прогноза во времени отработки выемочных столбов пока нет. Поэтому научно-техническое обоснование параметров локальной системы безопасного обслуживания ВЛ по «фактору состояния горного массива» для исключения возникновения аварийных ситуаций и снижения уровня травматизма, повышения уровня комфортности рабочих мест снижения себестоимости добычи угля, является актуальной научно-прикладной проблемой, которая имеет важные народно-хозяйственное, социальное и прикладное значения.

Построение физических моделей разрушения неоднородных и трещиноватых материалов типа горных пород осуществляется на основе статистических теорий, которые позволяют описывать механизм разрушения с единых позиций, как множественный процесс накопления рассеянных повреждений. В натурных условиях прогноз повреждения горных пород и возможных масштабов разрушений должен осуществляться на основе вероятностных методов надежности и долговечности, в основе которых должны быть физико-статистические модели разрушения [1].

В настоящее время не существует целостной системы локального геоконтроля безопасного обслуживания (ВЛ). Кроме разработки новых, более совершенных методов контроля и прогнозирования, необходимо совершенствование уже существующих. Одним из перспективных направлений здесь представляется использование вероятностно-статистического подхода.

Полученные ранее результаты [1] показывают перспективность использования статистической модели так называемого классического пучка нитей, которая достаточно полно отражает условия разрушения горных пород отрывом при сжатии. Эта модель основана на следующих допущениях:

а) возникающие при сжатии напряжения распределяются на структурные связи пропорционально их жесткости;

б) разрушение начинается разрывом наиболее жестких связей и последовательно по мере увеличения нагрузки распределяется на менее жесткие до полного исчерпания несущей способности всего пучка;

в) по мере выхода из строя структурных связей напряжения перераспределяются на уцелевшие.

Результаты проведенного качественного анализа такой модели позволяют уточнить физический и статистический смысл полной кривой напряжение-деформация $\sigma(\varepsilon)$ для горных пород [2]. Восходящая ветвь этой кривой до предела прочности материала отражает упругое деформирование и начальный постепенный характер разрушения отдельных связей, процесс при этом сохраняет устойчивость и в общем на этом участке $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\rangle 0$ [3]. Нисходящая ветвь кривой (после предела прочности, где $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}=0$ соответствует разрушению оставшихся связей и для этой ветви так называемый модуль спада $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\langle 0$.

Будем считать, что неоднородный стохастически трещиноватый материал состоит из бесконечного количества структурных связей различной степени прочности с функцией вероятности разрушения $P(\sigma)$, с помощью которой определяется относительное количество разрушенных связей при напряжениях, не превышающих σ. При $\sigma = 0$ разрушение не происходит и $P(\sigma) = 0$, а когда все связи разрушены, то $P(\sigma) = 1$. Часть пучка (относительная площадь поперечного сечения), в которой связи уже разрушены, равна $P(\sigma)$ и остаточная несущая способность зависит от количества не разрушенных связей $1 - P(\sigma)$.

Если $\sigma_{усл.}$ - условное напряжение в сечении не разрушенного пучка, то тогда истинное (действительное напряжение) $\sigma_{ист}$ запишется следующим образом :

$$\sigma_{ист} = \frac{\sigma_{усл.}}{1 - P(\sigma_{ист.})} \quad , \quad 0 \le P(\sigma_{ист.}) \le 1 \quad , \quad 0 \le \sigma_{ист.} \le \infty \quad . \tag{1}$$

$$\text{Тогда: } \sigma_{усл.} = \sigma_{\text{ист}} \left[1 - P(\sigma_{ист.})\right] , \tag{2}$$

в которой $\sigma_{ист} = \varphi(\varepsilon)$ - диаграмма деформирования структурных связей.

Для упрощения математических вычислений полагаем структурные связи равножесткими, идеально хрупкими и подчиняющимися закону Гука:

$$\sigma_{\text{ист}} = E\varepsilon \ , \tag{3}$$

где: Е - модуль упругости горной породы.

Подставляя зависимость (3) в формулу (2), получаем непосредственно зависимость между напряжением σ и деформацией ε :

$$\sigma(\ \varepsilon\ ) = E\ \varepsilon\ \left[1 - P(E\varepsilon)\right] , \tag{4}$$

где $P(E\varepsilon)$ представляет теперь функцию вероятности разрушения для элементарных связей по их предельным деформациям. Зависимость (4) описывает, в первом приближении, полный процесс деформирования и разрушения материала, как детерминированный результат стохастического процесса накопления повреждений при последовательном разрыве структурных связей с функцией вероятности их разрушения $P(\sigma)$ и с учетом перераспределения напряжений на не разрушенные.

Путем варьирования функциональным видом кривой распределения элементарных связей по прочности $P(\sigma)$, которая может принимать разнообразные конкретные выражения типа Гаусса, Вейбулла и др., и зависимостями напряжение - деформация $\sigma = \varphi(\varepsilon)$, для совокупности связей одновременно с выбором необходимого количества параметров в обеих зависимостях, можно с заданной точностью аппроксимировать полную диаграмму деформирования $\sigma(\ \varepsilon\ )$.

$$\sigma'(\ \varepsilon\ ) = \mathrm{E}\left[1 - P(E\varepsilon) - E\varepsilon P\ (E\varepsilon)\right] \tag{5}$$

Уравнение (5) упрощается и приводит к выражению для определения ε_{m} :

$$\left\{\ln\left[1 - P(E\varepsilon_m)\right]\right\}'_{\varepsilon} = -\frac{1}{\varepsilon_m} \ . \tag{6}$$

Если функция $P(\sigma)$ имеет обратную, то решение уравнения (6) значительно упрощается и для значений ε_m можно получить явное выражение в конечном виде. Подставив найденное значение ε_m в уравнение (4) находим максимальное значение полной диаграммы деформирования $\sigma(\varepsilon)$:

$$\varepsilon_m = E^2 \ \varepsilon_m^2 P(E\varepsilon_m) . \qquad (7)$$

Условие (5) может быть справедливо не только в отдельной точке ε_m, но и на некотором интервале значений ε . В этом случае полная диаграмма деформирования после достижения предела прочности не имеет ниспадающей ветви $\sigma(\varepsilon)$, а будет параллельна оси ε и имеет горизонтальный участок [4]. Распределение прочности структурных связей удовлетворяет следующему дифференциальному уравнению

$$1 - P(E\varepsilon) = E\varepsilon\, P'(E\cdot\varepsilon), \qquad \text{или:} \qquad (8)$$

$$P(E\varepsilon) = 1 - \frac{1}{E\varepsilon} ; \qquad (9)$$

Из уравнения (2) можно получить выражение для функции вероятности разрушения структурных связей материала:

$$P(\sigma) = 1 - \frac{\sigma(\varepsilon)}{\sigma'(0)*\varepsilon} . \qquad (10)$$

Плотность распределения для Р (σ) запишется в виде :

$$f(\sigma) = P'(\sigma) = \frac{\sigma(\varepsilon) - \varepsilon\sigma'(\varepsilon)}{[\ \sigma'(0)*\varepsilon\ ]^2} \qquad (11)$$

В качестве функции вероятности разрушения связей примем закон Вейбулла [3].:

$$P(\sigma) = 1 - exp\left[-\left(\frac{\sigma}{b}\right)^c\right], \ c > 0 , \qquad (12)$$

в котором параметр с представляет собой показатель однородности структурных связей материала по прочности, *a, b* - параметры масштаба. По нашим данным для углей и горных пород параметр с находится в пределах: $1 < c < 5$.

Подставляя значение $P(\sigma)$ из (12) в (4), получаем теоретическое уравнение для диаграмм полного процесса деформирования и разрушения в виде:

$$\sigma(\varepsilon)_{теор.} = E\varepsilon \ exp\left[-\left(\frac{E\varepsilon}{b}\right)^c\right] \quad . \qquad (13)$$

Уравнение (13) содержит три неизвестных параметра *E, b, c*, которые подлежат оцениванию на основании экспериментальной зависимости $\sigma(\varepsilon)$.

Из условий $\sigma' \ (0) = E$ получаем первое уравнение для определения параметра E путем численного определения через конечные разности вблизи начала координат кривой $\sigma(\varepsilon)$ или же графическим методом. Подставляя (12) в уравнение (6), находим теоретическое выражение для значений деформаций материала ε_m, при котором достигается максимум σ_m зависимости $\sigma(\varepsilon)$:

$$\varepsilon_m = \frac{b}{Ec^{1/c}} \quad . \qquad (14)$$

Подставляя (14) в (7), находим третье уравнение, устанавливающее связь экспериментального значения σ_m с параметрами кривой (13):

$$\sigma_m = \frac{b}{Ec^{1/c}} \ . \qquad (15)$$

Значения $\sigma'(0)$, σ_m и ε_m, определенные из полной диаграммы деформирования материала $\sigma(\varepsilon)$, позволяют составить систему трех уравнений с тремя неизвестными параметрами *E, b, c* :

$$\begin{cases} E = \sigma'(0) \\ \dfrac{b}{E * c^{\frac{1}{c}}} = \varepsilon_m \\ \dfrac{b}{(\varepsilon c)^{\frac{1}{c}}} = \sigma_m \end{cases} \qquad (16)$$

Подстановкой *b* и *c* в (12) определяем интегральную кривую распределения прочности связей Вейбулла или функцию, позволяющую вычислять вероятность разрушения структурных связей при данном напряжении σ.

Выбор функции вероятности разрушения структурных связей может быть осуществлен на основе функции распределения Седракяна [5]:

$$P(\sigma) = 1 - \left[1-\left(\frac{\sigma}{b}\right)^p\right]^q , \qquad (18)$$

где: *b* - параметр масштаба кривой, *p, q* - параметры формы распределения.

Подстановка (18) в (4) дает следующее выражение для полной кривой деформирования:

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon\left[1-\left(\frac{E\varepsilon}{b}\right)^p\right]^q, \tag{19}$$

которая имеет 4 неизвестных параметра. Вычисляя производную (19) и приравнивая ее 0, находим уравнение для определения его корней :

$$\sigma'(\varepsilon) = E\left[1-\left(\frac{E\varepsilon}{b}\right)^p\right]^{q-1}\left[1-(1+pq)\left(\frac{E\varepsilon}{b}\right)^p\right] = 0 \ . \tag{20}$$

Из первого сомножителя (20) получаем уравнение для нахождения значения касания кривой $\sigma^+(\varepsilon)$ первого порядка; для него в этой точке обращается в нуль не только $\sigma(\varepsilon)$ верхняя граница кривой), но и ее производная $\sigma'(\varepsilon)$. Это значение:

$$\varepsilon_k = b/E \qquad , \tag{21}$$

определяется на экспериментальной кривой, например, графическим методом сглаживания линейной зависимостью запредельной ветви кривой до пересечения с осью ε . Второй сомножитель из (20) дает уравнение для определения того значения деформации ε_m, при котором достигается максимум кривой $\sigma(\varepsilon)$:

$$\varepsilon_m = \frac{b}{E(1+pq)^{1/p}} \qquad . \tag{22}$$

Подставляя значение ε_m из (23) в (20), находим максимум кривой $\sigma(\varepsilon)$:

$$\sigma_m = \frac{b}{E(1+pq)^{1/p}} * \left(\frac{pq}{1+pq}\right)^q . \tag{23}$$

Уравнения (21) - (23) вместе с условием $\sigma'(0) = E$ составляют систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными *E, b, p* и *q*, подлежащими определению на основании экспериментальных данных $\sigma'(0)$, $\varepsilon_k, \varepsilon_m, \sigma_m$ для полной кривой деформирования :

$$
\begin{cases}
E = \sigma'(0), \\
\dfrac{b}{E(1+pq)^{1/p}} = \varepsilon_m, \\
\left(\dfrac{pq}{1+pq}\right)^q \dfrac{b}{(1+pq)^{1/p}} = \sigma_m, \\
\dfrac{b}{E} = \varepsilon_k.
\end{cases}
\tag{24}
$$

Система (24) может быть решена только численными методами, поэтому для получения простого и явного решения ее необходимо упростить, положив, например, $p = 1$. В этом случае система (24) имеет решение в явном виде и для определения ее параметров получаем формулы:

$$
q = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_m} - 1 \quad ; \quad b = \frac{\sigma_m (q+1)^{q+1}}{q^q} \quad ; \quad E = \frac{b}{\varepsilon_k}
\tag{25}
$$

Функция вероятности разрушения структурных связей $P(\sigma)$ представляет собой фактически, меру накапливаемой поврежденности, которая по мере нагружения материала возрастает от нуля до единицы, если уровень исходной поврежденности принят за нулевой, поэтому методически более правильно рассматривать уровень поврежденности используя понятие структурной энтропии s_{cm} [6], величина которой является интегральным параметром, характеризующим уровень безопасности работы ВЛ по «горному» фактору. В работе [7] установлена взаимосвязь $P(\sigma)$ и структурной энтропии s_{cm} горной породы.

На основании исследований, результаты которых изложены в [7,8] и с учетом приведенных выше выкладок, автором (Мещанинов С. К.) сформулировано научное положение о том, что уровень структурной энтропии s_{cm} т. е. поврежденности части горного массива, вмещающего лаву при очистных работах зависит от глубины ведения горных работ, способа управления кровлей в лаве, необратимо увеличиваясь в период отработки всего выемочного столба, зависит от отношения естественной и принудительной скоростей повреждения горного массива, последняя из которых находится в линейных зависимостях от количества пластов в разрабатываемой свите, сопротивления механизированной крепи и крепи усиления штреков, других охранных сооружений, характеров их распределения по длине и ширине лавы.

В работах [7,8] установлена взаимосвязь плотности распределения структурных связей, энтропии и таких физических параметров горных пород, как относительная диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$, скорость прохождения УЗ-волн. Последние являются теми параметрами, текущий контроль которых можно обеспечить при работе ВЛ. Перечисленные выше параметры являются однозначными функциями физико-механических свойств горного массива, текущий контроль которых необходим в ходе работы ВЛ.

Пор результатам проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

- структурная энтропия горных пород S_{cm} является параметром для оценки уровня безопасности работы ВЛ;

- использование вероятностно-статистического подхода применительно к разработке и обоснованию структуры и параметров системы локального геоконтроля ВЛ позволяет существенно повысить его надежность и достоверность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирничанский Г.Т. , Рубец Г.Т. Применение статистической модели для оценки степени накопления поврежде.ний в горных породах.- Теория и практика проектирования строительства и эксплуатации высокопроизводительных подземных рудников (Сб. научн. тр. Всес.научн.-техн.конф.).-М.: МГИ, 1990.- С.139-140.
2. Кирничанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород.- Киев: Наукова думка, 1989.- 184 с.
3. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций.- М.: Машиностроение , 1990.- 448 с.
4. Ржаницын А.Э. Теория расчета строительных конструкций на надежность.- М.: Стройиздат, 1978 .- 239 с.
5. Моменты и оценка параметров кривой распределения Седракяна в статистической теории прочности / В.Т. Глушко, Г.Т. Рубец, Н.Т. Бобро, Л.И. Гажемон .- Надежность и прочность технических систем.- Киев: Наукова думка, 1976.- С.28-33.
6. Алексеев Г. Н. Энергоэнтропика.-М.:Знание, 1983.- 192 с.
7. Зорин А. Н., Бондаренко В. И., Грядущий Ю. Б. И др. К вопросу устойчивости породных обнажений //Науковий вісник НГАУ. -2000. - №1, С. 100-101.
8. Мещанинов С. К.О взаимосвязи поврежденности горных пород и их физических параметров в задачах оценки устойчивости подземных пространств и породных обнажений /12- я научная школа «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». - Алушта,16 - 22 сент. 2002.

УДК 622.235:502.64

Э.И. Ефремов, Е.В. Польская

СНИЖЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ МАССОВЫХ ВЗРЫВАХ В КАРЬЕРАХ

Розглянуті питання впливу типу вибухових речовин на обсяг викидів пилу та шкідливих газів при проведенні вибухових робіт в кар'єрах. Обгрунтована область застосування вибухових речовин з урахуванням типу і обводненості порід та мінімальної забрудненості навколишнього середовища.

THE LOWERING OF ECOLOGICAL LOADING ON ENCIRCLE SURROUNDINGS IN A TIME OF MASS EXPLOSIONS IN SAND QUARRIERS

The problems of influence such as explosive materials on a volume of lets of dust and parasitic gases are considered at realisation of blasting in open pits. The usage of explosive materials with allowance for such as and floods of rocks and minimum pollution of environment is justified.

Влияние крупных горнодобывающих предприятий на окружающую среду в настоящее время становится существенным на площадях нескольких сотен квадратных километров. Происходит не только механическая перестройка ландшафта из-за производимых горных работ, но также и нарушение водного баланса, изменение растительного покрова и загрязнение окружающей среды