

Г.И. Гайко, Л.А. Горбатова

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ КРЕПИ

Рассмотрено поведение системы «комбинированная крепь – массив» с позиций теории надежности. Предложен показатель надежности выработки по всей ее протяженности. Оценено влияние резервных элементов крепи и управление ее несущей способностью на надежность выработки. Обоснована целесообразность способа крепления магистральных выработок с резервированием надежности крепи.

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ ПРИ УПРАВЛІННІ НЕСУЧОЮ ЗДАТНІСТЮ КРІПЛЕННЯ

Розглянуто поведіння системи «комбіноване кріплення – масив» з позицій теорії надійності. Оцінений вплив резервних елементів кріплення та управління його несучою спроможністю на надійність виробки. Обґрунтована доцільність способу кріплення магистральних виробок з резервуванням надійності кріплення.

ESTIMATION OF MINE WORKING RELIABILITY AT CONTROLLING SUPPORT LOADED CAPABILITY

On results mine researches dependence of stability index of the main and development workings is got on their general extent. Influence of the generalized index of workings' stability is set on the relative monthly longwall's power. Nonlinear dependence of relative prime price of coal is set on general length of the supported workings.

Эффективное проектирование крепи горных выработок является одной из наиболее сложных проблем при строительстве и эксплуатации угольных шахт. Об этом свидетельствуют значительные (до 30%) объемы рамных крепей, находящихся в деформированном состоянии, из которых полностью перекрепляется около 35% рам. В тоже время имеются многочисленные выработки, где крепь находится в недогруженном состоянии (имеет завышенный запас прочности), что приводит к нерациональному удорожанию конструкций. Стоимость крепления и поддержания горных выработок составляет в себестоимости угла до 15% [1].

Обеспечение надежности горных выра-

боток в течение всего срока их эксплуатации является основной задачей при проектировании и строительстве горных предприятий. Одной из форм представления показателя надежности является вероятностная, в силу вероятностной природы функционирования горной выработки в условиях большого числа влияющих факторов, полностью учесть которые на стадии проектирования не представляется возможным. Наиболее распространенным в практике проектирования остается подход, при котором расчетную нагрузку на крепь определяют по величине типового смещения вмещающих пород, что изначально предполагает некоторые объемы ремонтов и перекреплений горных выработок на участках,

где условия отличаются от типовых. При этом задача оптимизации затрат между повышением стоимости (материалоемкости) крепи и объемами ремонтных работ может быть успешно решена в рамках теории случайных функций [2].

Наряду с традиционными методами проектирования шахтной крепи все большее распространение стали получать методы двухстадийного проектирования, основы которого были впервые предложены А. Бруннером, Л. Мюллером и Л. фон Рабцевичем в Новоавстрийском методе сооружения тоннелей (1958 г.). Этот подход требует мониторинга состояния выработки, уточнения и корректирования проектных решений во время ее сооружения и поддержания, т.е. управления несущей способностью крепи в зависимости от геомеханической ситуации по длине выработки путем усиления конструкции на участках, где смещения достигли сигнальных значений [3]. В условиях угольных шахт применение крепей регулируемого сопротивления не исключило ремонтных работ, причем функциональные простои выработок в период их проведения могли приводить к весьма высоким экономическим потерям.

Развитием методов двухстадийного проектирования выработок с высокой функциональной ответственностью является разработанный в ДонГТУ способ крепления выработок с резервированием надежности крепи (введением избыточности) [1, 4-5]. Способ предполагает определение наиболее неблагоприятных для проектных условий нагрузок на крепь и установку по всей длине выработки комбинированной конструкции (состоящей из постоянной и резервной крепи), суммарная несущая способность которой соответствует максимальным прогнозным нагрузкам. На второй стадии проектирования производится дальнейший мониторинг состояния выработки и после реализации смещений породного контура, в случае выявления недогруженного состояния крепи выполняют облегчение ее конструкции поэтапным демонтажем элементов резервной крепи. При этом демонтаж ре-

зервной крепи следует производить в несколько этапов, продолжая наблюдения за смещениями пород и состоянием комбинированной крепи. Одновременно должны выполняться мероприятия, направленные на разгрузку и/или упрочнение приконтурного породного массива, что предполагает использование в качестве постоянной крепи породонесущие конструкции (анкера в сочетании с набрызг-бетоном, инъекционным упрочнением массива и др.), а в качестве резервных элементов – подпорные конструкции (рамные крепи, стойки усиления и т.п.), которые при необходимости легко демонтировать.

Рассмотрим поведение системы «комбинированная крепь – массив» с позиций теории надежности. Воспользуемся общим уравнением системы [6-8]:

$$L_u = q,$$

где q – элемент из пространства входных параметров Q (внешняя нагрузка со стороны массива на крепь);

u – элемент из пространства выходных параметров U (характеристика крепи – ее грузонесущая способность);

L – оператор системы.

При помощи характеристик крепи (элементов пространства U) можно охарактеризовать любое состояние системы, а именно – недогруженное, нормальное эксплуатационное, неустойчивое и аварийное состояния крепи (т.е. каждому состоянию соответствует элемент $u \in U$). По длине выработки одно состояние способно переходить в другое, что обусловлено возможным изменением свойств вмещающего массива (изменением значений q из пространства входных параметров Q) или изменением несущей способности крепи по длине выработки (изменением состояний), что описывается функциями $u(l)$, геометрическим изображением которых являются линии в пространстве состояний U .

Для описания качества системы (надежности горной выработки) введем про-

пространство V . Каждому показателю надежности горной выработки (каждому качеству системы) поставим в соответствие элемент $v \in V$, который может меняться с изменением линейной координаты (по длине выработки). Таким образом, каждой линии $u(l)$ в пространстве состояний U соответствует некая линия $v(l)$ из пространства качества V (показатель надежности горной выработки). Связь между элементами этих пространств состояний и качества зададим линиями операторного уравнения:

$$V = Mu,$$

где M – оператор системы.

Множество состояний системы, которые допустимы с точки зрения качества (достаточная надежность горной выработки), образует в пространстве качества V область допустимых состояний Ω_0 (недогруженное и нормативное эксплуатационное состояния крепи). Граница этой области Ω_0 соответствует предельному состоянию (т.е. состоянию, при котором горная выработка не теряет своей надежности и, значит, не перестает быть устойчивой). Обозначим эту границу Γ и назовем предельной поверхностью (предельной надежностью горной выработки). Если $v \in \Omega_0$, то параметры качества системы (показатель надежности горной выработки) находятся в установленных допустимых пределах и горная выработка остается достаточно устойчивой. Пересечение же линией $v(l)$ предельной поверхности Γ (допустимых пределов показателя надежности) соответствует отказу системы (невозможности эксплуатации горной выработки или эксплуатации ее с чрезмерными издержками). При этом предельное состояние конструкции можно представить в виде случайного выброса из области допустимых состояний [6].

В рассматриваемой системе «крепь–массив» внешнее воздействие (внешняя

нагрузка на крепь со стороны массива) $q(l)$ и оператор уравнения L являются стохастическими, поэтому линии $v(l)$ в нашем пространстве качества V (надежность горной выработки) тоже будут стохастическими. Отказ системы (потеря горной выработкой или ее участком устойчивости) – случайное пересечение линией $v(l)$ предельной поверхности Γ , т.е. случайный выброс элемента из области допустимых состояний. Функцию надежности в этом случае определим как вероятность нахождения элемента $v(\tau)$ в допустимой области Ω_0 , на интервале $0 < \tau \leq l$:

$$P(l) = P[v(v) \in \Omega_0; 0 < \tau \leq l].$$

Это общая схема нахождения надежности горной выработки, которая учитывает физические, технические и эксплуатационные условия работы системы «крепь – массив».

Рассмотрим с этих позиций стохастическую модель протяженной подготовительной горной выработки более предметно. Неоднозначная форма породного контура, формирующая неравномерную контактную нагрузку, меняющиеся по длине выработки прочностные и деформационные свойства вмещающих пород, геологические особенности пластового массива, характеристики крепи, заданные при монтаже и некоторые другие факторы приводят к тому, что надежность горной выработки как системы «крепь–массив», ее устойчивость на разных участках не одинаковы и случайным образом меняются по длине выработки. В результате воздействия различных силовых полей Q_i (формы проявления горного давления) элементы этой сложной по своей природе системы создают и воспринимают нагрузки P_i (рис. 1) различной интенсивности по длине выработки.

Интенсивность внешней нагрузки со стороны массива на крепь $q(l)$ является случайной функцией координаты l (рис. 2, а), причем достоверное определение функ-

ции $q(l)$ на стадии проектирования не представляется возможным. Поскольку мы рассматриваем горные выработки не подверженные влиянию очистных работ, где условия формирования нагрузки сходны, то случайная функция $q(l)$ имеет примерно равные по длине математические ожидания и дисперсии, а значит, является стационарной.

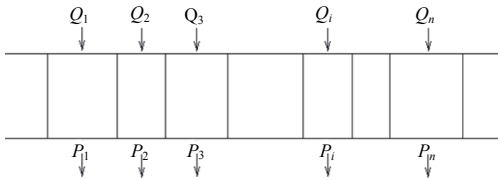


Рис. 1. Зависимость нагрузок P_i , создаваемых и воспринимаемых системой «крепь-массив», от воздействия силовых полей Q_i

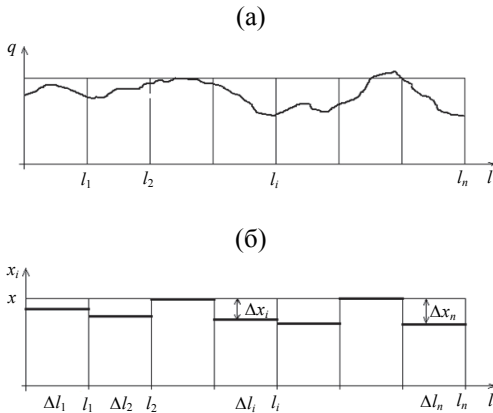


Рис. 2. Вероятностная модель горной выработки, закрепленной базовой и резервной крепью: распределение нагрузки q по длине выработки (а); величины резервных элементов Δx_i , которые могут быть демонтированы в соответствии с распределением нагрузки q (б)

Пусть при самых неблагоприятных условиях нагружения системы базовой и резервной крепи со стороны горного массива на каждом i -ом участке горной выработки необходимо обеспечить несущую способ-

ность x (наличие максимальной нагрузки). В случае обнаружения в ходе эксплуатации горной выработки на отдельных ее участках недогруженного состояния крепи имеем Δx_i резервных элементов крепи (рис. 2, б), для которых при проектировании горной выработки должна быть предусмотрена возможность последующего демонтажа (приведения в соответствие с фактическим нагружением).

Показатель надежности системы (горной выработки) выразим в виде произведения [6]:

$$R(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n) = \prod_{i=1}^n R_i(\Delta x_i),$$

где $R(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)$ – показатель надежности горной выработки, при условии нахождения на ее 1-м участке Δx_1 резервных элементов; на 2-м участке – Δx_2 резервных элементов, ..., на n -м участке – Δx_n резервных элементов;

$R_i(\Delta x_i)$ – показатель надежности i -го участка горной выработки, при условии нахождения на нем Δx_i резервных элементов крепи;

n – общее число участков горной выработки ($i = 1, 2, \dots, n$).

Несущую способность крепи, обеспечивающую заданную надежность выработки определим как:

$$W(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n) = \sum_{i=1}^n W_i(\Delta x_i),$$

где $W_i(\Delta x_i)$ – несущая способность i -го участка крепи, при условии нахождения на нем Δx_i резервных элементов.

Для i -го участка системы (горной выработки) несущая способность составит:

$$W_i(\Delta x_i) = \omega_i \cdot \Delta x_i,$$

где ω_i – несущая способность одного резервного элемента, используемого на i -м участке системы (горной выработки).

Тогда при наличии только одного ограничивающего фактора можно сформулировать задачу оптимизации: путем резервирования надежности системы, состоящей из n участков, достичь того, чтобы полученный показатель надежности был не меньше заданного R_0 при минимально возможной несущей способности («весе») крепи горной выработки в целом.

Используя введенные обозначения, эту задачу предложено записать в виде:

– найти $\min W(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)$ – при условии $R(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n) \geq R_0$.

Или, путем резервирования надежности системы (крепи горной выработки), состоящей из n участков, достичь того, чтобы при максимально возможном показателе надежности R системы (горной выработки) «вес» (несущая способность) всей системы не превысил заданного значения W_0 .

Используя введенные обозначения, эту задачу можно записать в виде:

– найти $\max R(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)$ – при условии $W(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n) \leq W_0$.

Несущую способность крепи горной выработки определим как:

$$\begin{aligned} W(\Delta x_1 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) &= \sum_{i=1}^n W_i(x_i + \Delta x_i) = \\ &= \sum_{i=1}^n W_i(x_i) + \sum_{i=1}^n W_i(\Delta x_i), \end{aligned}$$

где $W_i(x_i + \Delta x_i)$ – несущая способность i -го участка крепи при условии нахождения на нем x_i основных и Δx_i резервных элементов (см. рис. 2, б).

В качестве показателя надежности крепи на i -том участке горной выработки введем отношение:

$$R_{ni} = \frac{W_i(x_i + \Delta x_i)}{W_0},$$

где W_0 – максимальное нагружение, действующее на наиболее нагруженном уча-

стке горной выработки.

Тогда показатель надежности крепи по всей протяженности l горной выработки получим в виде:

$$R_{ni} = \int_0^l \frac{W_i(x_i + \Delta x_i)}{W_0} dl.$$

Очевидно, что чем ближе показатель надежности к единице, тем рациональнее (эффективнее) используется крепь горной выработки.

В отличие от традиционного подхода, который для определения эффективности применения крепи использует коэффициент запаса прочности (отношение предельных и фактических напряжений), данный показатель впервые позволяет оценить эффективность использования крепи по всей длине горной выработки с учетом наличия элементов резервной крепи (Δx_i) и максимальных нагрузок, действующих на наиболее опасном участке горной выработки.

С этих позиций рассмотрим различные подходы к проектированию крепи. При традиционном проектировании (отсутствие резервных элементов, $\Delta x_i = 0$) в случае ошибочного занижения величины ожидаемых внешних нагрузок на крепь (проектные ошибки 1-го рода), будет принята крепь с недостаточной несущей способностью (предлагаемый показатель R_n может быть значительно меньше единицы). Это приводит к отказам крепи на многочисленных участках и необходимости перекрепления выработки, что может вызвать длительную потерю функционирования выработки (на время ремонтных работ), которая в отдельных случаях приводит к чрезвычайно высоким издержкам [5].

В случае ошибочного завышения ожидаемых нагрузок на крепь (проектные ошибки 2-го рода) имеем недогруженное состояние крепи, ее избыточную несущую способность ($R_n > 1$), что приводит к завышенной материалоемкости крепи, затрате излишних трудовых ресурсов и, в результате, к неоправданно высокой стоимо-

сти горной выработки.

Рассмотрим вариант проектирования крепи горной выработки с наличием резервных элементов Δx_i , которыми можно управлять (демонтировать в случае выявления недогруженного состояния базовой и резервной крепи). В этом случае появляется возможность регулировать несущую способность крепи и безопасно (для состояния выработки) приближаться от $R_n > 1$ к $R_n = 1$. Результатом является

обеспечение соответствия несущей способности крепи проявлениям горного давления по всей протяженности горной выработки, что регламентирует минимальные материальные затраты при гарантированном уровне надежности выработки.

Таким образом, постановка приведенной задачи в виде нахождения $\max R(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)$ позволяет оптимизировать экономические показатели надежного крепления и поддержания горной выработки.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайко, Г.І. Конструкції кріплення підземних споруд [Текст]: навч. Посібник / Г.І. Гайко. – Алчевськ: ДонДТУ, 2006. – 133 с.

2. Шашенко, А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики [Текст] / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К.: вид-во ун-ту «Пульсари», 2002. – 304 с.

3. Корчак, А.В. Методология проектирования строительства подземных сооружений [Текст]. – М.: Недра коммуникайшнс ЛТД, 2001. – 416 с.

4. Gayko, G. Method for drifting the headings with reliable reserved support / G.Gayko, L. Gorbatowa //Gornictwo i Geoinzynieria, rok 34, zeszyt 2. – Krakow: AGH, 2010. – P. 283-287.

5. Гайко, Г.И. Учет функциональной ответственности выработок при проектировании шахтной крепи [Текст] / Г.И. Гайко, В.Н. Окапелов // Уголь Украины, 2001. – № 6. – С. 39-40.

6. Акимов, В.А. Надежность технических систем и техногенный риск [Текст] / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.М. Попов, В.А. Пучков, В.И. Томаков, М.И. Фалеев. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.

7. Козлов, Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики [Текст] Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Советское радио, 1975. – 472 с.

8. Болотин, В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений [Текст] / В.В. Болотин. – М.: Изд-во лит-ры по стр-ву, 1971. – 256 с.

ОБ АВТОРАХ

Гайко Геннадий Иванович – д.т.н., профессор кафедры строительных геотехнологий Донбасского государственного технического университета.

Горбатова Людмила Александровна – ассистент кафедры высшей математики Донбасского государственного технического университета.