

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА УСТАНОВКИ АНКЕРНОЙ КРЕПИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Аннотация. Проведено исследование изменения во времени напряженно-деформированного состояния пород приконтурного массива вокруг горной выработки с анкерной крепью. Решение нестационарной задачи геомеханики выполнено с помощью метода конечных элементов. В статье приведены распределения полей геомеханических параметров в различные моменты времени в зависимости от скорости проведения выработки.

Горная выработка, анкерная крепь, нестационарное нагружение, метод конечных элементов.

Введение

Наиболее эффективным средством поддержания выработок является анкерная крепь [1]. Она по всем технико-экономическим показателям имеет значительные преимущества по сравнению с традиционными рамными видами крепи. Одним из основных факторов, влияющих на качество возведения анкерной крепи является расстояние установки анкеров от груди забоя. Данная работа направлена на определение оптимальных значений данного параметра в зависимости от темпов проведения горной выработки.

Основными этапами в технологическом цикле проведения выработки с анкерной крепью являются: выемка проходческим комбайном массива на величину заходки, обычно равную или кратную шагу установки крепи, отгрузка горной массы, доставка в забой и установка анкерной крепи в соответствии со схемой, предусмотренной Паспортом.

При отставании от временного графика, определенного технологией установки анкерной крепи, подработанные породы и обнаженный забой выработки разгружаются от горного давления, происходит разуплотнение пород – теряется их природная монолитность. Анкер-

ная крепь, установленная в потерявший монолитность породный массив, уже не сформирует из приконтурных пород единую конструкцию, гарантирующую сохранность выработки в течение всего срока ее службы. В таком случае анкер выполняет только функцию подшивания непосредственной кровли к основной.

Постановка задачи

Исследуем динамику изменения поля напряжений вокруг горной выработки во время 15-ти технологических циклов анкерного крепления. Каждый технологический цикл соответствует подвиганию забоя горной выработки на шаг заходки и установку одного ряда анкеров.

Нестационарное напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки описывается системой уравнений [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X(t) + T_x(t) &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y(t) + T_y(t) &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z(t) + T_z(t) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; t – время; $X_i(t)$ – внешние силы; $T_i(t)$ – силы, вызванные внутренним трением; u_i – перемещения ($i=x, y, z$).

Силы $T_i(t)$ пропорциональны скорости изменения перемещений.

$$T_i(t) = -c \frac{\partial}{\partial t} u_i, \quad (2)$$

где c – коэффициент демпфирования, определяемый экспериментально.

Учет времени t при нестационарной постановке увеличивает размерность задачи, что существенно ее усложняет и делает невозможным получение точного аналитического решения. Это обусловило необходимость применения численного метода решения.

В матричной форме дифференциальное уравнение (1) с учетом (2) может быть записано в следующем виде:

$$[K]\{U\} + [C] \frac{\partial}{\partial t} \{U\} + \{F\} = 0, \quad (3)$$

где $[K]$ – матрица жесткости; $[C]$ – матрица демпфирования; $\{U\}$ – вектор узловых перемещений; $\{F_g\}$ – вектор усилий в узлах.

В качестве начальных условий задаются распределения перемещений и их скоростей, а также напряжений, соответствующих глубине расположения горной выработки.

$$\{U\}|_{t=0} = \{U_0\}, \quad \frac{\partial \{U\}}{\partial t}|_{t=0} = \{V_0\}.$$

$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H, \quad \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H, \quad \sigma_{zz}|_{t=0} = \lambda \gamma H,$$

где γ – усредненный объемный вес вышележащей толщии горных пород; H – глубина разработки; λ – коэффициент бокового распора.

В качестве граничных условий – перемещения на вертикальных и горизонтальных границах внешнего контура расчетной области.

$$u_x|_{\Omega_1} = 0, \quad u_y|_{\Omega_2} = 0,$$

где Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура.

Матрицы жесткости и демпфирования получаются путем интегрирования по объему конечного элемента:

$$[k] = \int_V [B]^T [D] [B] dV,$$

$$[c] = \int_V c [N]^T [N] dV,$$

где $[B]$ – матрица связи деформаций конечного элемента и его узловых перемещений, обусловленная соотношениями Коши; $[D]$ – матрица упругих характеристик материала; $[N]$ – матрица функций формы применяемого конечного элемента.

Напряжения определяются по найденным перемещениям:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{u\} + \{\sigma_0\}. \quad (4)$$

При достаточно малом интервале времени Δt можно считать, что производная от функции перемещения по времени приближенно равна [3]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{u_{i1} - u_{i0}}{\Delta t},$$

где u_{i0} , u_{i1} – векторы перемещений в моменты времени t_0 и $t_0 + \Delta t$.

Или в матричном виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \{U\} = \frac{\{U\}_1 - \{U\}_0}{\Delta t}. \quad (5)$$

При подстановке выражения (5) в уравнение (3) после преобразований получим:

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \{U\}_{t+\Delta t} = \left(\frac{2}{\Delta t} [C] - [K] \right) \{U\}_t - (\{F\}_t + \{F\}_{t+\Delta t}) \quad (6)$$

Полагая, что на момент времени t распределение перемещений задано, из решения системы уравнений (6) получаем распределение перемещений и напряжений (4) на момент времени $t + \Delta t$. Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

Методика решения задачи

Геомеханические процессы, протекающие в окрестности горной выработки, имеют сложный пространственный характер. Напряженно-деформированное состояние приконтурных пород горного массива существенно меняется как вдоль выработки, особенно на участках, близких к забою, так и вглубь массива. Поэтому будем решать задачу в объемной упруго-пластической постановке. На рис. 2 представлена расчетная схема задачи.

Проведем расчет полей напряжений для следующих условий. Высота выработки – 3 м, расстояние между рядами анкеров – 0,8 м, длина анкера – 2,4 м. Время установки 1 ряда анкеров – 30 - 40 мин.

Сетка конечных элементов изменяется во время расчета: при очередной выемке породы из расчетной схемы исключаются на величину заходки соответствующие конечные элементы; при установке очередного ряда анкеров добавляются конечные элементы, моделирующие анкерные штанги.

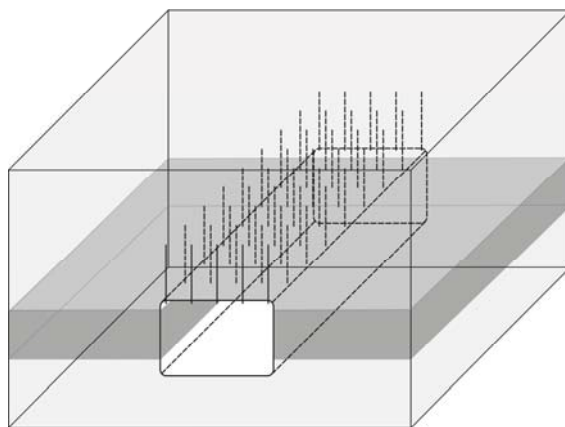


Рисунок 1 - Расчетная схема

Результаты расчета

На рис. 2 показаны распределения значений параметра $Q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H}$, который характеризует степень разнокомпонентности поля напряжений. При выемке породы на один шаг заходки и установке первого ряда анкерной крепи, анкера начинают препятствовать расслоению пород в кровле выработки. Основным механизмом их работы на данном этапе заключается в сшивании разрушенных пород непосредственной кровли и подвешивании их к более прочным породам основной кровли. При дальнейшем проведении выработки и установке анкеров формируется переходный участок, на котором постепенно уменьшается разнокомпонентность поля напряжений – анкера понижают значение параметра Q в кровле выработки до безопасного уровня. Одновременно при этом увеличивается минимальная компонента главных напряжений, достигая порогового уровня, при котором приконтурный горный массив имеет несущую способность, близкую к монолитной горной породе. Сжатые области вокруг отдельных анкерных штанг пересекаются, образуя сплошное перекрытие. На данном этапе анкерная крепь уже полностью используется в качестве основного вида крепи.

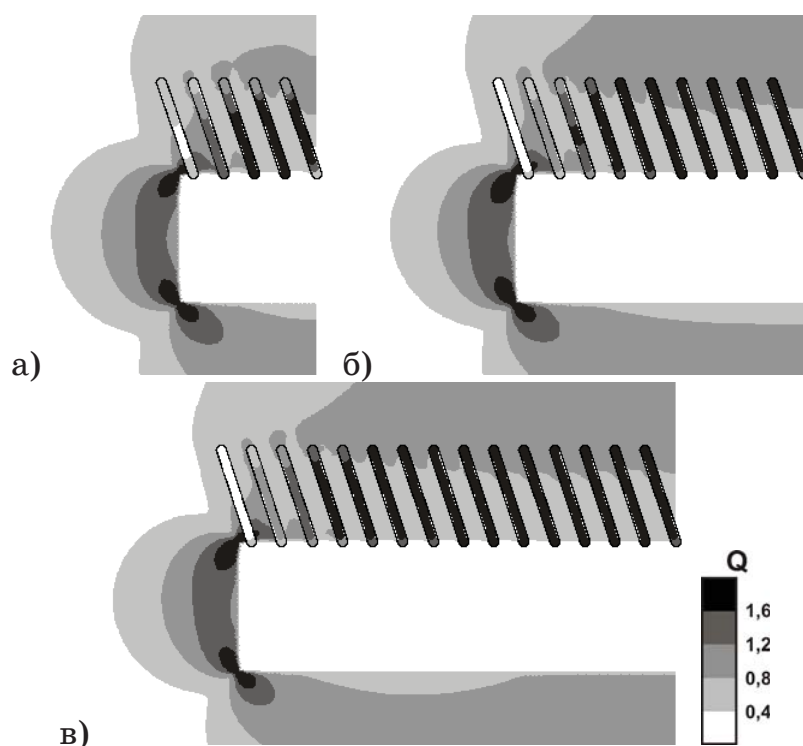


Рисунок 2 - Распределение значений параметра $Q = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$ в массиве и усилий в анкерах при отходе забоя на а) 4м, б) 8м и в) 12м

В дальнейшем, при установке в забое выработки анкерных штанг, закрепленных полимерным составом, породные блоки в непосредственной близости от штанги после отхода забоя остаются сжатыми, поскольку имеют возможность смещения вовнутрь выработки только в рамках упругих деформаций штанги, а нагрузка на ближние к забою анкера уменьшается.

Для исследования влияния скорости проведения выработки и расстояния места установки анкеров до забоя проведены расчеты для нескольких технологических схем. Скорость проведения выработки изменялась в диапазоне 5 – 40 м/сут, с ее дискретными значениями: 5, 7,5, 10, 15, 30 и 40 м/с. Расстояние места установки анкеров до забоя варьировалось в диапазоне 0,3 – 5 м с дискретными значениями: 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8, 1, 1,5, 2, 3 и 5 м.

На рис. 3 приведены графики смещений кровли при установке анкеров: в 0,3 м от забоя выработки, в 1 м, в 2 м и в 5 м от забоя при скорости проведения выработки 10 м/сут.

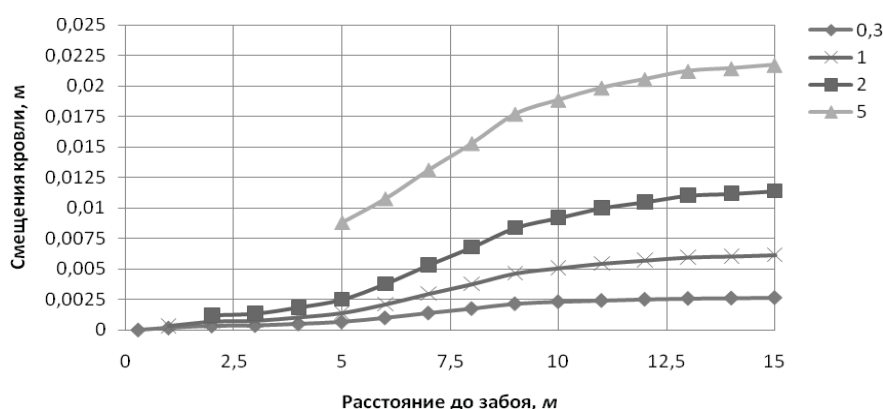


Рисунок 3 - Смещения кровли при установке анкеров: в 0,3 м от забоя выработки, в 1 м от забоя, в 2 м от забоя, в 5 м от забоя

В первом варианте, анкерная крепь устанавливается в 0,3 м от забоя выработки. И при его отходе анкера сразу же включаются в работу, сопротивляясь смещениям горной породы внутрь выработки. При отставании места установки анкерной крепи на большее расстояние от забоя приконтурный массив в течение определенного времени (для 5 м время достигает 12-18 ч) имеет возможность беспрепятственно смещаться, что приводит к его разгрузке. Таким образом, анкера будут устанавливаться в уже нарушенную породу, а в случае слабых пород Западного Донбасса с низким значением предела прочности на растяжение – в практически разрушенную.

Влияние изменения скорости проведения выработки при установке анкеров в 0,3, 1 и 2 м представлено на рис. 4.

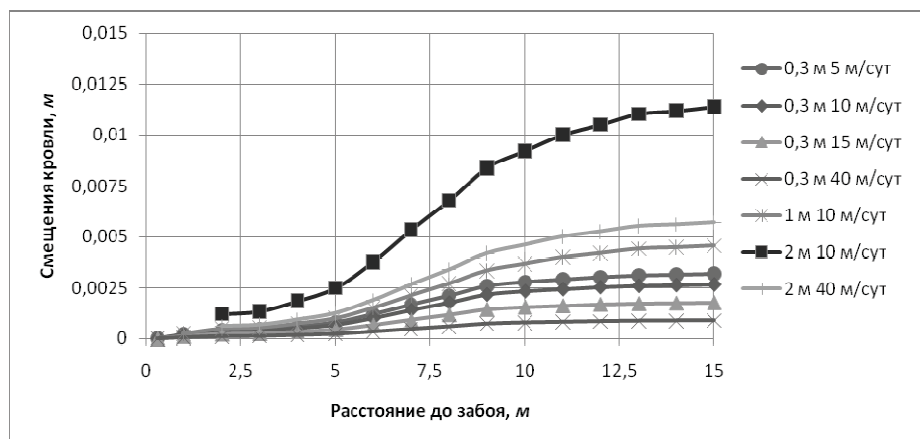


Рисунок 3 - Смещения кровли при установке анкеров: в 0,3 м от забоя выработки при скорости проведения 5, 10, 15 и 40 м/сут, в 1 м и в 2 м от забоя при скорости проведения 10 и 40 м/сут

На основании полученных зависимостей определено, что оптимальное отставание анкерного ряда крепления от плоскости забоя при комбайновом способе проведения выработки составляет 300 мм при скорости проведения 5-10 м/сут, 400 мм при скорости 10-15 м/сут, 600 мм при скорости 20-30 м/сут; 1000 мм при скорости 30-40 м/сут.

Выводы

Разработана математическая модель изменения во времени напряженно-деформированного состояния пород приконтурного массива вокруг горной выработки при выполнении технологического цикла установки анкерной крепи. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о существенном влиянии скорости проведения выработки, отставания установки анкеров от забоя на процесс последующего деформирования анкерных штанг и приконтурных пород. При ее повышении с 5 до 30 м/сут возможно увеличить отставание с 0,3 м до 1,0 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булат, А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск: Ин-т геотехнической механики НАН Украины, 2002. – 372 с.
2. Круковский А.П. Оценка характера воздействия сталеполимерного анкера на приконтурный горный массив / А.П. Круковский // Методы розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Д.: ДНУ, 2006. – Вип. 7. – С. 64-72.
3. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 544 с.