

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД В ОБЛАСТЯХ ВЕДЕНИЯ МАСШТАБНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Н.М. Климкович, М.А. Николайчик, М.А. Журавков
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. При исследовании геомеханического состояния массивов горных пород с подземными сооружениями, довольно часто требуется определить его напряженно-деформированное состояние (НДС) в течении длительного промежутка времени. В таких задачах целесообразно рассматривать породный массив как вязкоупругую среду с использованием различных моделей ползучести.

В настоящее время, существует небольшое число прикладных пакетов численного моделирования, позволяющих рассматривать исследуемое тело в вязкоупругой постановке. Одними из таких программных пакетов являются Ansys Mechanical APDL и Abaqus. В них предложено множество различных моделей ползучести, некоторые из которых приведены в таблице 1 [1, 2].

Таблица 1. Некоторые модели ползучести, приведенные в программных пакетах Ansys Mechanical APDL и Abaqus

№ модели	Название модели	Уравнение	Программный комплекс
1	Strain Hardening	$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} \epsilon_{cr}^{C_3} e^{-C_4/T}, C_1 > 0$	Ansys Mechanical APDL
2	Time Hardening	$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3} e^{-C_4/T}, C_1 > 0$	
3	Exponential Form	$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 e^{\sigma/C_2} e^{-C_3/T}, C_1 > 0$	
4	Norton	$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-C_3/T}, C_1 > 0$	
5	Time Hardening	$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3}, C_1 > 0, C_2 > 0, -1 < C_3 \leq 0$	Abaqus
6	Strain Hardening	$\dot{\epsilon}_{cr} = \left\{ C_1 \sigma^{C_2} [(C_3 + 1) \epsilon_{cr}]^{C_3} \right\}^{\frac{1}{C_3+1}}, C_1 > 0, C_2 > 0, -1 < C_3 \leq 0$	
7	Hyperbolic-sine	$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 [\sinh(C_2 \sigma)]^{C_3} e^{-\frac{H}{R(T-T^0)}}, C_1 > 0, C_2 > 0, C_3 > 0$	

где $\dot{\epsilon}_{cr}$ – скорость эквивалентной деформации ползучести, σ – эквивалентное напряжение по Мизесу, ϵ_{cr} – эквивалентная деформация ползучести, T – температура, t – время, H – энергия активации, R –

универсальная газовая постоянная, T^0 – температура абсолютного нуля, C_n – некоторые константы, определяемые опытным путем.

Приведенные модели ползучести хорошо подходят для исследования вязкоупругого поведения металлических конструкций в течении длительного промежутка времени. Однако, их использование для решения задач геомеханики приводит к наличию больших излишних деформаций ползучести, величина которых растет по мере увеличения рассматриваемой глубины.

Данное обстоятельство, прежде всего, связано с тем, что приведенные в таблице 1 модели ползучести никак не учитывают начальное (естественное) напряженное состояние, в котором находится нетронутые породные массы [3]. Одним из способов решения данной проблемы является применение следующей разработанной модели ползучести (1):

$$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma^0} \right)^{C_2}, C_1 > 0 \quad (1)$$

где σ^0 – эквивалентное напряжение по Мизесу в ненарушенном породном массиве.

Разработанная модель позволяет учесть изменение НДС только в тех участках породного массива, которые подвержены влиянию горных работ. Так, на отдаленных от мест ведения горных работ участках породного массива, где $\sigma \rightarrow \sigma_0$, значение $\dot{\epsilon}_{cr} \rightarrow C_1$, которая, в свою очередь, является величиной порядка 1×10^{-11} 1/с.

Верификация разработанной модели. Верификация предложенной модели проводилась при исследовании характера деформирования некоторых исследовательских выработок на Петриковском месторождении калийных солей. Исследуемые выработки имели ширину 3 и 4 м и располагались на трех исследовательских участках с разными привязками кровли выработок по отношению к переслаиванию каменной соли и сильвинита (рисунок 1). При проходке данных выработок в их кровле устанавливалась анкерная крепь. Горные работы велись на глубине 1025 м.

Алгоритм моделирования поведения породных масс в окрестности выработок состоял из трех расчетных шагов. Решение задач выполнялось на основе метода конечных элементов (МКЭ) в плоско-деформированной постановке [4].

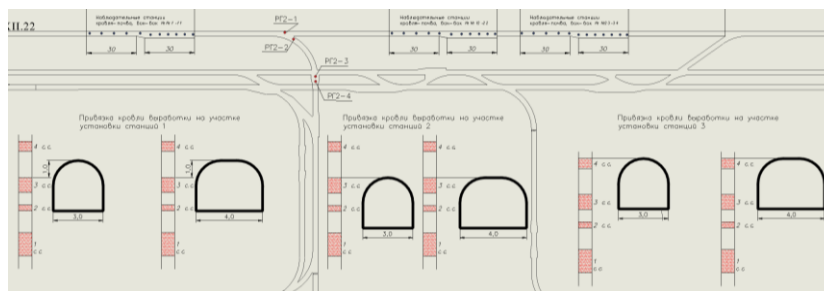


Рисунок 1 – Схема исследовательских участков и места установки наблюдательных станций

На *первом этапе* моделирования определялось начальное напряженное массива, на *втором этапе* моделирования – НДС массива горных пород в момент проходки выработки, на *третьем этапе* моделирования – НДС массива горных пород спустя 190 суток после проходки выработки. На первых двух этапах массив горных пород рассматривался как упругая среда, на последнем – как вязкоупругая среда. Между слоями каменной соли и сильвинита, а также между породными слоями и анкерной крепью, принимались условия полного контакта.

Константы C_1 и C_2 определялись по результатам обработки данных натурных исследований. В результате получены следующие значения данные параметров: $C_1 = 6 \cdot 10^{-12}$ для каменной соли и $C_1 = 20 \cdot 10^{-12}$ для сильвинита; средние значения для параметра $C_2 = 1$ для каменной соли и сильвинита.

Отметим, что вследствие того, что геомеханическое поведение породных масс в различных частях контура выработки (в кровле, боках и почве) различается друг от друга, расчет значения C_2 при перемещении по контуру выработки выполняется согласно следующему алгоритму.

В окрестности каждой выработки выделяется область радиусом $R = 1.5 \cdot b$, где b – ширина выработки. Центр координат данной области находится в центре выработанного пространства. Внутри данной области константа C_2 для модели ползучести (1) вычисляется следующим образом:

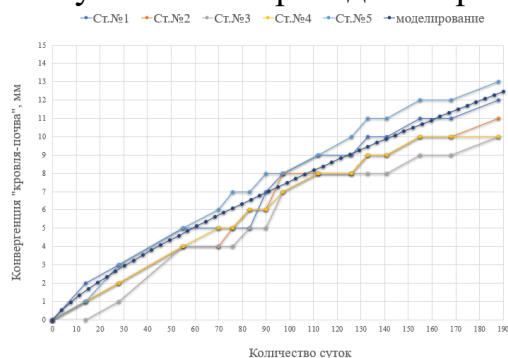
$$C_2 = 2 + 2|\sin(\varphi)|$$

где φ – полярный угол, отсчитываемой от горизонтальной оси.

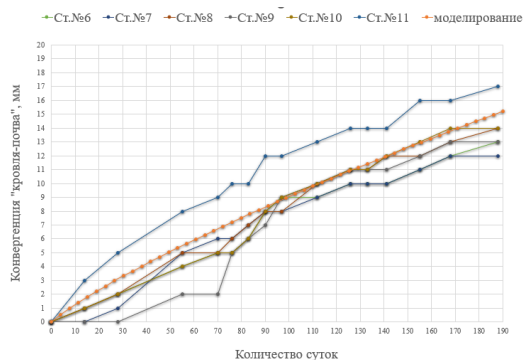
Так, значение константы C_2 внутри данной области в зоне боковых поверхностей выработки приблизительно равнялось двум, а в зонах кровли и почвы выработки – четырем, вне данной области – единице.

Далее, на рисунке 2 приведены некоторые графики конвергенции (взаимного сближения) верхней и нижней точек («кровля-почва») выработок, а также их боков («бок-бок») в зависимости от времени

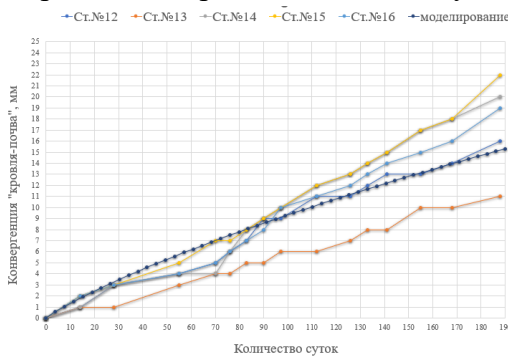
согласно данным наблюдательных станций (рисунок 1) и результатам моделирования на третьем этапе. В таблице 2 приведена минимальная разница между значениями конвергенций, полученных согласно результатам моделирования и данным наблюдательных станций, спустя 190 суток после проходки выработок.



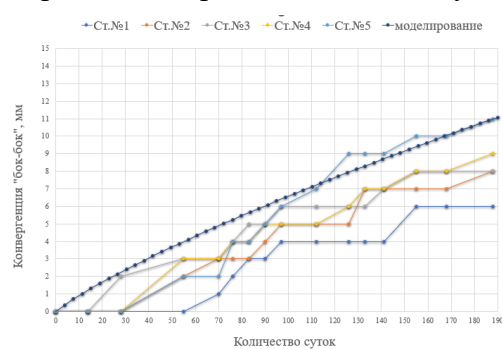
Конвергенция «кровля-почва» для выработки шириной 3 м на 1-ом участке



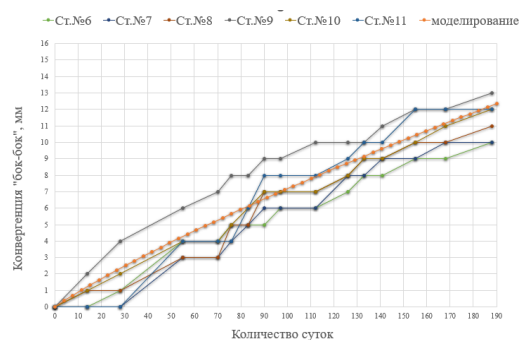
Конвергенция «кровля-почва» для выработки шириной 4 м на 1-ом участке



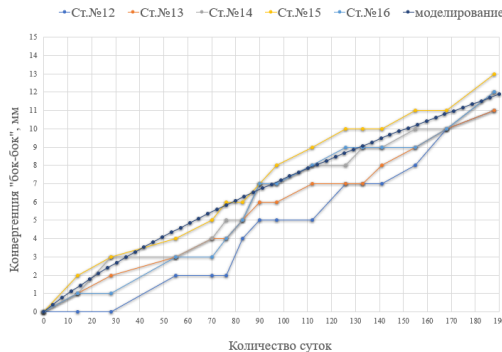
Конвергенция «кровля-почва» для выработки шириной 3 м на 2-ом участке



Конвергенция «бок-бок» для выработки шириной 3 м на 1-ом участке



Конвергенция «бок-бок» для выработки шириной 4 м на 1-ом участке



Конвергенция «бок-бок» для выработки шириной 3 м на 2-ом участке

Рисунок 2. Конвергенции «кровля-почва» и «бок-бок» некоторых исследовательских выработок

Таблица 2. Минимальная разница между значениями конвергенций, полученных по результатам третьего этапа моделирования и данным наблюдательных станций

№ исследовательского участка	Ширина выработки, м	Разница в конвергенции «кровля-почва»	Разница в конвергенции «бок-бок»
1	3	4%	1%
	4	9%	3%
2	3	4%	1%
	4	0%	4%
3	3	2%	2%
	4	3%	7%

Согласно данным таблицы 2, средняя величина минимальной разницы между значениями конвергенций, полученными согласно результатам моделирования и данным наблюдательных станций, спустя 190 суток после проходки выработок, для предложенной модели составляет 3%. Абсолютное значение отклонения не превышает 7%.

Закключение. Таким образом, была разработана и верифицирована модель ползучести, учитывающая как начальное (естественное) напряженное состояние, в котором находятся нетронутые породные массы, так и различное геомеханическое поведение породных масс на контуре выработок. В ходе сравнительного анализа было показано, что алгоритм численного моделирования, использующий разработанную модель ползучести, имеет малую погрешность относительно данных натурных наблюдений, а значит, позволяет корректно определять НДС породного массива с подземными выработками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Басов К. А. Справочник пользователя ANSYS //М.: ДМК-пресс. – 2005.
2. Helwany S. Applied soil mechanics with ABAQUS applications // John Wiley & Sons. – 2007.
3. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений: учебник для Вузов.-2-е изд. //М.: Недра. – 1994. – Т. 2.
4. Журавков М.А., Николайчик М.А., Климкович Н.М. Оценка возможности уменьшения размеров охранных целиков при ведении очистных работ в окрестности шахтных стволов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 22-32.