

УДК 622.25:004.925.84

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Иголка Д.А. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь)

В статье приводятся основные процессы трехмерного моделирования проходки вертикальных шахтных стволов в слабых аргиллитовых породах. Проведен анализ начального поля напряжений массива, деформационных процессов в призабойной части и нагрузок на бетонную крепь. Выполнена оценка прочности крепи по результатам расчетов модели и по результатам аналитического решения.

Введение

Анализ опыта добычи полезных ископаемых показывает, что с ростом глубины разработки месторождений, а также и на меньших глубинах при сложных природных условиях залегания полезных ископаемых, шахтные стволы испытывают возрастающую интенсивность проявлений горного давления, а их крепь – увеличивающиеся нагрузки и опасные деформации. Это сопровождается потерей крепью несущей способности, что приводит к необходимости восстановления нормального эксплуатационного состояния стволов со значительными капитальными затратами. Работы по креплению горных выработок, как при строительстве, так и при эксплуатации горнодобывающих предприятий, являются трудоемкими и весьма затратными. Опыт строительства указывает на то, что в общей стоимости и трудоемкости строительства рудника вертикальные шахтные стволы составляют порядка 20-30 %, а в зависимости от горно-геологических условий могут достигать и 50 %, особенно когда выработки сооружаются способом замораживания. В свою очередь, стоимость сооружения крепи стволов составляет около 60 % от стоимости всего комплекса работ по их строительству. В связи с выбывающей рудной сырьевой базой в последнее годы активизировалось освоение новых участков месторождений калийных солей Беларуси, а также других полезных ископаемых за пределами нашего государства. Есть все основания полагать, что за последние 20 лет вопросы шахтного строительства остаются без должного внимания, в то время как в передовых зарубежных странах строительные технологии достигли ощутимого прогресса. В связи с высокой стоимостью капитальных затрат на операции и материалы, связанные с креплением вертикальных стволов, данный вопрос не теряет своей актуальности и требует проведения исследований с целью повышения технико-экономических показателей строительства новых стволов и повышения безопасности эксплуатационных показателей их крепи. Итак, при увеличивающейся интенсивности проявлений горного давления традиционные крепи стали не обеспечивать надлежащую сохранность горных выработок. Рационализация конструкций и повышение несущей способности традиционных крепей посредством завышения коэффициента запаса без теоретического обоснования приводит к излишней материалоемкости крепей и к излишним капитальным затратам. В то же время еще не в полной мере использованы все возможности прикладных наук – механики подземных сооружений и строительной механики для разработки методов расчета и проектирования крепей горных выработок на основе применения современных программ расчета. Исследование вопросов крепи

шахтных стволов с использованием самых современных программных комплексов позволит обеспечить в сложных горно-геологических условиях разработки повышение сохранности горных выработок в эксплуатационном состоянии. Использование современных методов компьютерного моделирования позволяет решать задачи в объемной постановке.

Постановка задачи и исследования

Процесс проектирования бетонной крепи вертикальных стволов связан с решением ряда сложных научных задач горно-геологического и горнотехнического характера. В первую очередь необходимо определить характер естественного поля напряжений на участке возведения крепи и установить значения главных напряжений в массиве. Ответственным моментом является определение расчетных исходных данных, а именно определения масштабного эффекта и переход от физико-механических свойств испытуемых образцов горных пород к свойству массива. Важной задачей является прогноз смещения массива и исследование нагрузок на крепь с целью выбора ее оптимальных параметров и расчета прочности. Конечным результатом исследований является обоснование и определение технологических параметров возведения конструкции крепи.

Выполним трехмерное моделирование процесса проходки и крепления шахтного ствола совмещенным способом. Моделирование выполнено в программном комплексе «MidasGTS». Данный программный комплекс представляет собой пакет решений численным методом конечных элементов. Главное преимущество решения численными методами заключается в том, что они достаточно оперативно позволяют получить решение при различных геометрических параметрах, разных силовых полях и других входных параметрах, а также позволяют быстро осуществить анализ механической системы.

Рассмотрен участок ствола в необводненных слабых аргиллитах на глубине от 300 до 350 м, закрепленный монолитной бетонной крепью. Нагрузка на крепь непосредственно связана с технологией проходки выработки. В данном случае предполагается совмещенный способ с высотой заходки 4 метра.

Исходные данные: диаметр ствола вчерне – 8,4 м; материал крепи – бетон (удельный вес – 24 кН/м^3 , модуль упругости – 22000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,2); толщина крепи – 0,7 м.

Характеристика вмещающего массива (среда Кулона-Мора):

- удельный вес – $21,7 \text{ кН/м}^3$; расчетный модуль деформации – 375 МПа; коэффициент Пуассона – 0,45; сцепление – 0,2 МПа; угол внутреннего трения – 30° .

Для расчетов выполним трехмерную модель объекта путем задания области размещения модели, начальных горно-геологических условий и начального напряженно-деформированного состояния массива (рисунок 1, 2). Далее выполняется стадийное моделирование процесса проходки, осуществляется выемка породы на 4 м и установка монолитной бетонной крепи в предыдущей заходке. Таким образом, выполнена модель тринадцати заходов, в результате чего, представляется возможным провести анализ напряженно-деформированного состояния массива в призабойном пространстве и при дальнейшем продвижении забоя. Вертикальные напряжения в массиве на исследуемом участке изменяются с увеличением глубины от 6,24 МПа до 7,69 МПа. Боковые напряжения в массиве распределены равномерно и изменяются от 5,15 МПа до 6,28 МПа.

При проходке горных выработок в напряженном массиве деформации и смещения происходят уже в процессе обнажения пород до возведения крепи. В

результате проявления начальных смещений происходит разгрузка массива, что в дальнейшем оказывает существенное влияние на последующие нагрузки на крепь. Данные смещения можно определить аналитическими методами при решении плоской одномерной задачи, однако существенные сложности возникают при неравнокомпонентном поле напряжений, и особенно при некруглом сечении выработки. Трехмерное моделирование позволяет получить эти значения при вышеперечисленных сложностях. По результатам моделирования приведены начальные смещения поверхностей в призабойной зоне выработки (рисунок 3). Максимальные смещения на почве забоя – 0,11 м и на обнаженной стенке – 0,06 м.

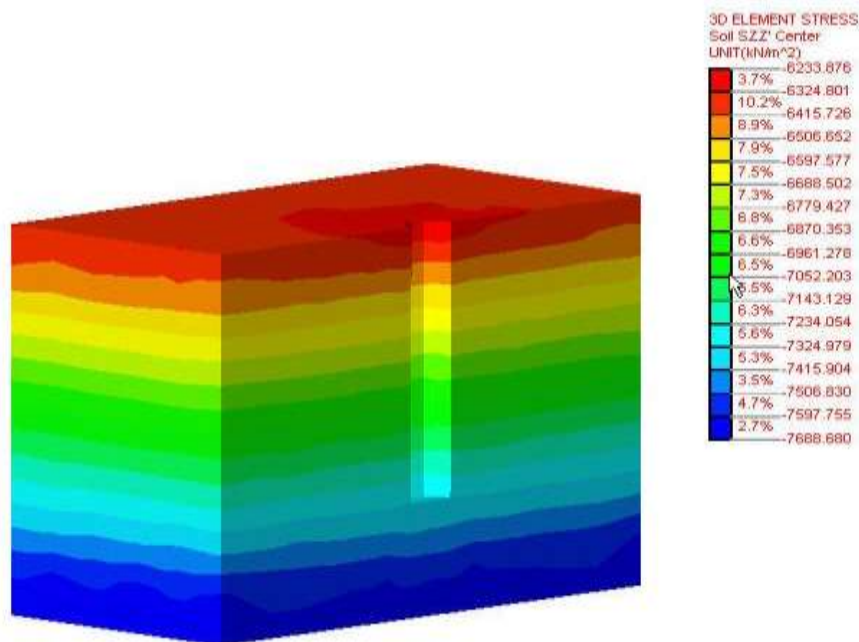


Рисунок 1 – Главные вертикальные напряжения трехмерной модели

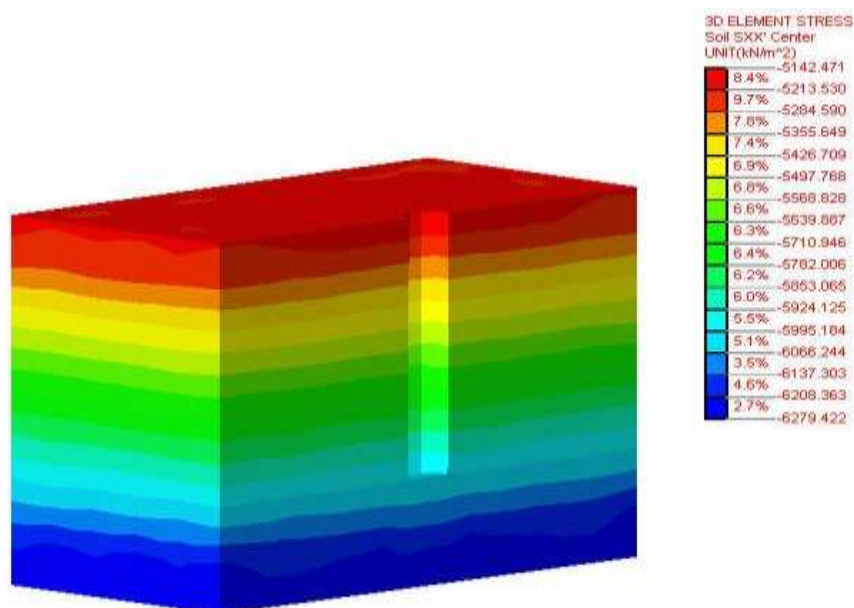


Рисунок 2 – Главные боковые напряжения трехмерной модели

В результате подвигания забоя и установки крепи через каждые 4 метра дальнейшее увеличение деформаций массива пород формирует нагрузки на крепь ствола. Моделью установлены напряжения на внутреннем и внешнем контуре крепи, а также выполнены расчеты моментов, продольных и поперечных сил в бетоне. Значения продольных усилий N и моментов M в радиальном сечении крепи являются определяющими при оценке ее прочности. На рисунке 4а и 4б показаны эпюры данных сил, максимальное значение момента $M = 0,129 \text{ МН}\cdot\text{м}$, продольной силы $N = 11,803 \text{ МН}$.

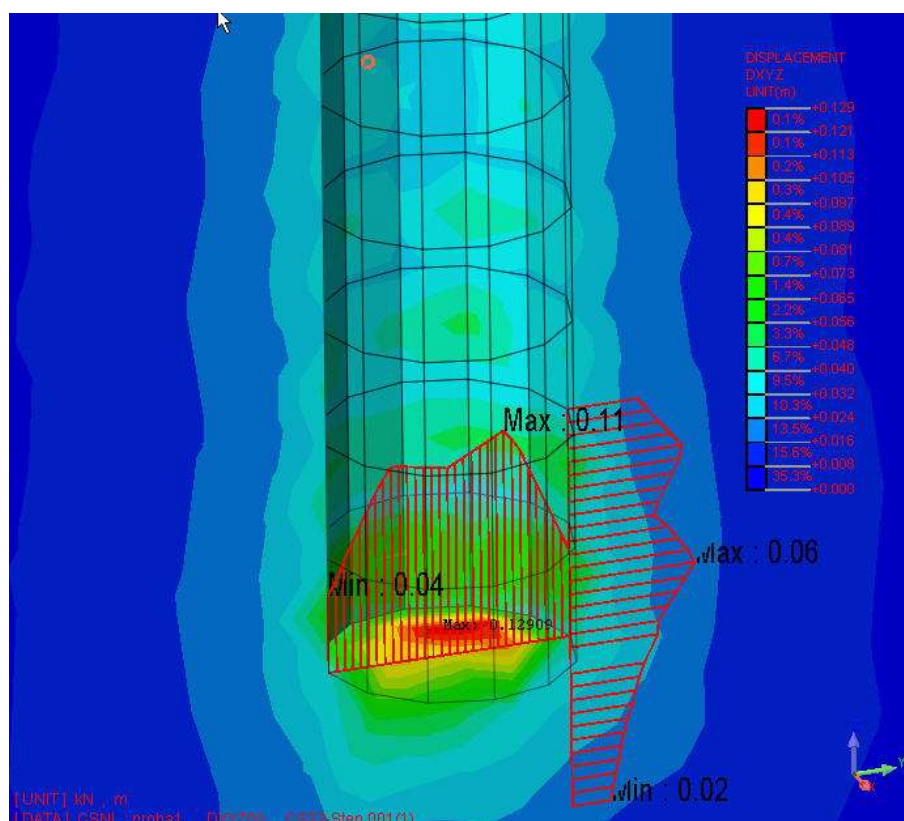


Рисунок 3 – Смещения в почве и стенке забоя на отм. -348,0 м

Условия прочности крепи:

$$N < N_u, \quad (1)$$

где N – расчетные продольные внутренние усилия в крепи, кН;

N_u – предельная продольная сила определяемая по [1], кН.

Предельная продольная сила для бетонной крепи вычисляется по формуле (2):

$$N_u = R_b b t \left(1 - 2 \frac{e}{t}\right), \quad (2)$$

где R_b – предел прочности на сжатие бетона класса С32/40 по предельному состоянию первой группы – 17,7 МПа;

b – ширина крепи рассматриваемого сечения, для сплошной крепи принимается 1 м;

t – толщина бетонной крепи – 0,7 м;

e – эксцентриситет продольной силы:

$$e = \frac{M}{N}, \quad (3)$$

где M – расчетный изгибающий момент в радиальном сечении крепи.

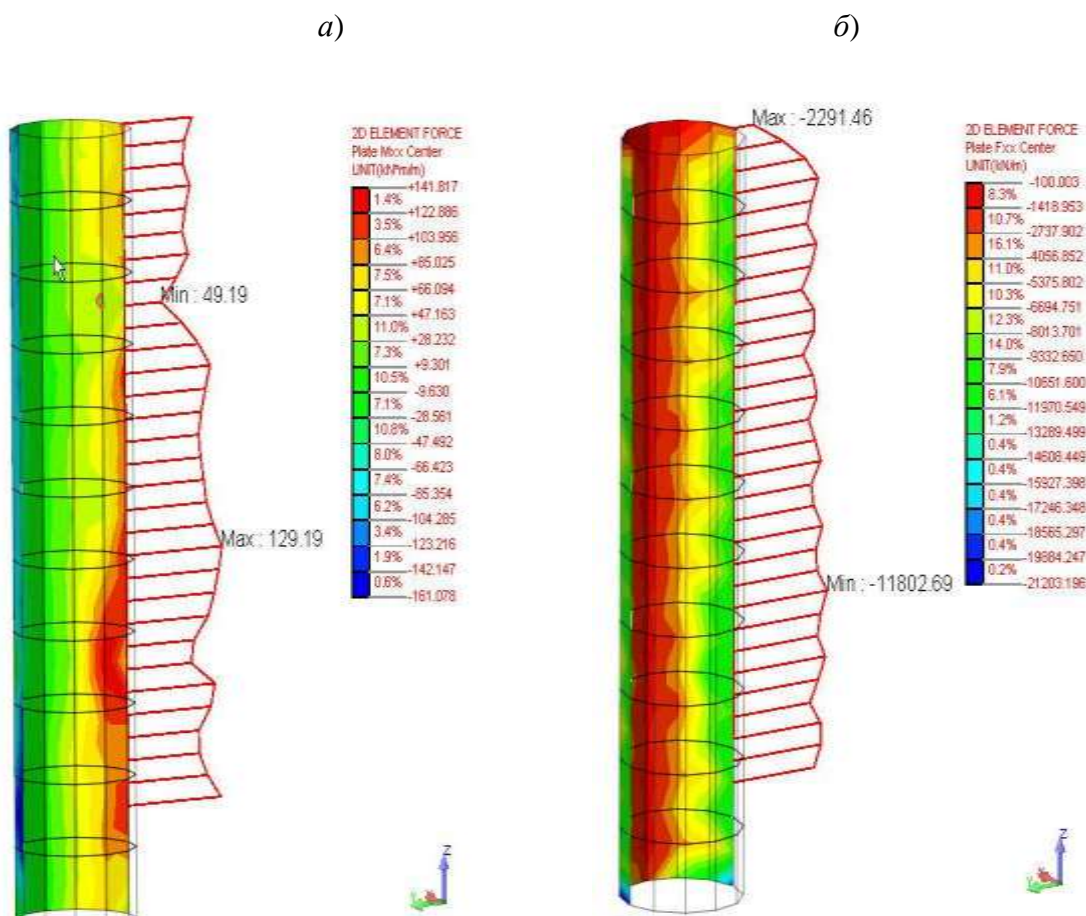


Рисунок 4 – Эпюры нагрузок на бетонную крепь ствола:

a – изгибающих моментов; *б* – продольных усилий

Предельная продольная сила составляет $N_u = 12,0$ МН, что больше расчетного значения продольной силы $N = 11,8$ МН. По результатам расчетов выполненных численными методами принятая крепь $t = 0,7$ м удовлетворяет условиям прочности.

С целью определения объективности полученных результатов выполним расчет крепи в заданных исходных данных методом, основанным на строгих законах теории упругости. Аналитическое решение выполним в программе РК-2, позволяющей

рассмотреть взаимодействие крепи с массивом, как единую совместно деформируемую систему. По сути, программа РК-2 является алгоритмом решения, описанного в монографиях Н.С. Булычева [2]. Программа предназначена для расчета крепи вертикальных шахтных стволов и рекомендуется действующими нормативными документами [3]. Путем вычислений по формулам [2] полученные результаты расчета представлены в таблице.

Таблица – Результаты расчета крепи в программе РК-2

| P , МПа | $\sigma_{\text{вн}}$, МПа | $\sigma_{\text{внутр}}$, МПа | N , МН | M , МН·м |
|-----------|----------------------------|-------------------------------|----------|------------|
| 2,53 | 16,93 | 13,85 | 10,77 | 0,126 |

где P – напряжения на контакте крепи с массивом (нагрузка на крепь), МПа;

$\sigma_{\text{вн}}$ – напряжения на внешнем контуре бетонной крепи, МПа;

$\sigma_{\text{внутр}}$ – напряжения на внутреннем контуре крепи, МПа;

При выполнении расчета в программе РК-2 были получены значения напряжений на внешне и внутреннем контуре крепи, а значения продольной силы моментов рассчитаны по формулам (4), (5) известным из сопротивления материалов [3]:

$$N = tb \frac{\sigma_{\text{вн}} + \sigma_{\text{внутр}}}{2}, \quad (4)$$

$$M = t^2 b \frac{\sigma_{\text{вн}} - \sigma_{\text{внутр}}}{12}. \quad (5)$$

В результате расчета по формуле (2) определено значение предельных усилий в крепи $N_u = 11,98$ МН, что также не превышает допустимых расчетных в РК-2 $N = 10,77$ МН.

По результатам расчета видна сходимость значений продольных усилий и моментов, полученных в решении по нормативным документам [2] и программном комплексе «MidasGTS».

Заключение

В результате использования трехмерного моделирования проходки ствола и сходимости результатов с аналитическим решением получена модель, на основании которой можно проводить дополнительные необходимые исследования. Ряд необходимых решений, связанных с технологией сооружения крепи и в целом строительства ствола, требует постановки сложных задач, которые являются достаточно трудоемкими, а зачастую очень громоздкими при использовании аналитических методов. Трехмерное моделирование в современных программных комплексах позволяет решать не только задачи, связанные с определением деформаций, перераспределением полей напряжений, расчетом нагрузок и усилий, а также решать сложные сопряженные задачи. Например, определение параметров крепи с учетом пластических свойств бетона при его формировании и деформировании массива, а также решение задач с учетом температурного поля массива и перераспределения напряжений в результате изменения объема пород. Решение этих задач является целью

дальнейших исследований для выявления характерных свойств системы «крепь – массив», которые смогут обеспечить принятие максимально эффективных решений при проектировании бетонной крепи вертикальных стволов.

Возможности трехмерного моделирования процесса проходки шахтного ствола позволяют устанавливать характер горного давления соответствующий равномерному распределению полей напряжения в массиве, осуществлять прогноз смещений контура призабойной выработки и производить расчет нагрузок на крепь. По установленным нагрузкам выполнять анализ прочности крепи и определять параметры ее несущей способности.

Список использованных источников

1. Бетонные и железобетонные конструкции СНБ 5.03.01-02. – Минск, 2003 – 39 с.
 2. **Булычев, Н.С.** Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1994. – 278 с.
 3. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.
-

Поступила в редакцию 21.02.2012 г.