УДК 622.26

**Е.Р.КОВАЛЬСКИЙ**, *канд. техн. наук, доцент, e.r.kovalsky@gmail.com*
**С.П.МОЗЕР**, *канд. техн. наук, доцент, mozer1@yandex.ru*
**М.А.МЕДВЕДСКОВ**, *студент, maxwell28@yandex.ru*
*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург*

**E.R.KOVALSKY**, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, e.r.kovalsky@gmail.com*
**S.P.MOZER**, *PhD in eng. sc., associate professor, mozer1@yandex.ru*
**M.A.MEDVEDSKOV**, *student, maxwell28@yandex.ru*
*National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg*

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ВЫРАБОТКИ

В статье приведен пример использования метода конечных элементов для решения задачи горной геомеханики. Оценены параметры напряженно-деформированного состояния массива в окрестности незаглубленной транспортной выработки. Приведены некоторые результаты численного моделирования.

***Ключевые слова:*** выработка, метод конечных элементов, массив горных пород, численное моделирование.

# ESTIMATION OF PEARAMETERS OF STRESS-AND-STRAIN STATE OF ROCK MASS IN VICINITY OF A TRANSPORT EXCAVATION

An example of application of finite element method in rock mechanics is presented. Parameters of stress-and-strain state of rocks in vicinity of a shallow transport excavation are estimated. Some results of numerical modeling are presented.

***Key words:*** excavation, finite element method, rock mass, numerical modeling.

Одним из эффективных инструментов горной геомеханики является метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий с высокой степенью точности решать задачи, которые в замкнутом виде традиционными аналитическими методами получить невозможно. Рассмотрим пример использования МКЭ для решения задачи об оценке параметров напряженно-деформированного состояния массива, вмещающего закрепленную выработку.



Рис.1. Исследуемая транспортная выработка

Транспортная выработка полигонального сечения 3,5×3 м пройдена в непосредственной близости от поверхности (склона). Выработка закреплена бетонной крепью толщиной 10 см, с модулем Юнга $E_б = 30000$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu_б = 0{,}2$, объемным весом $\gamma_б = 0{,}02$ МН/м$^3$ (рис.1).

Вмещающие породы представлены нетрещиноватыми песчаниками с пределом прочности на сжатие в образце $\sigma_{сж} = 75$ МПа, коэффициентом сцепления $C = 4$ МПа, углом внутреннего трения $\varphi = 33°$, объемным весом $\gamma = 0{,}029$ МПа.

На рис.2 представлена конечно-элементная модель (расчетная схема). Задача решает-

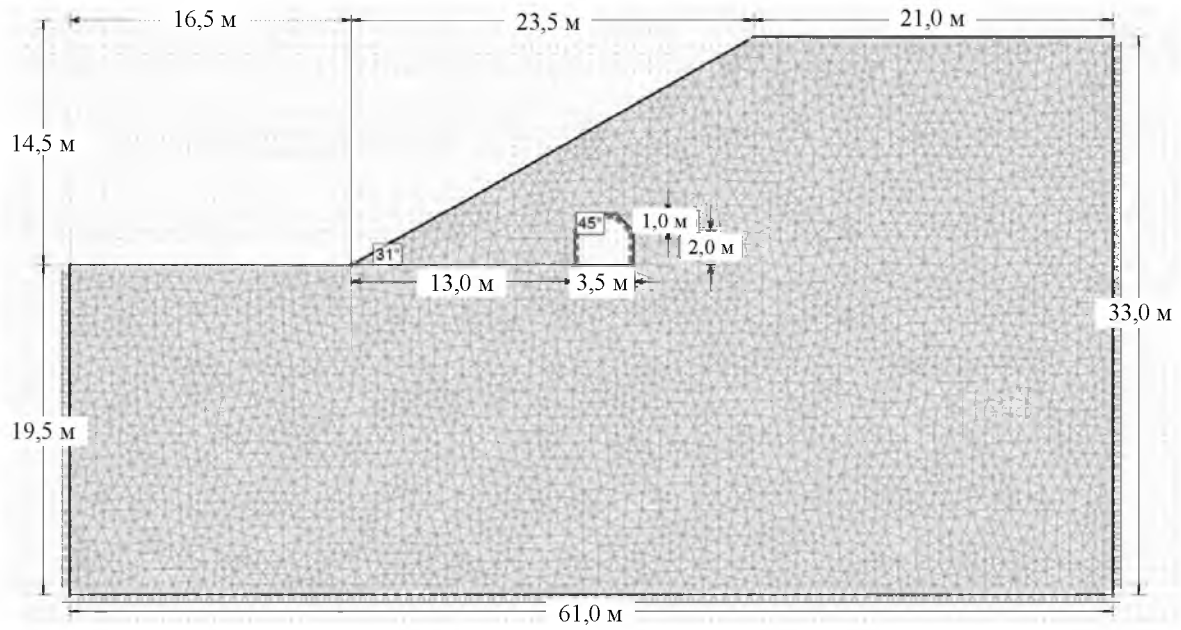



Рис.2. Расчетная схема и сетка конечных элементов к рассматриваемой задаче

ся в постановке плоской деформации, что оправдано для протяженных выработок. Горные породы моделируются как упруго-пластическая среда. Боковые поверхности модели закреплены в горизонтальном направлении, нижняя поверхность – в вертикальном. Верхняя поверхность представляет собой поверхность земли и может свободно перемещаться.

Размеры модели приняты таким образом, чтобы исключить влияние ее границ на исследуемую область. Для горных выработок, в окрестности которых анализируются механические процессы, размер зоны влияния $L$ можно определить, полагая, что на границе исследуемой области напряжения должны отличаться от их значений в ненарушенной выработкой массиве на 15 %. Рассматривая выработки кругового поперечного сечения, эквивалентные по площади некруговым выработкам, приходим к выражению*:

$$L = 6\sqrt{F/\pi} = 6R_0,$$

где $F$ – площадь поперечного сечения исследуемой выработки в проходки; $R_0$ – эквивалентный радиус.

Для условий задачи минимальное расстояние от выработки до границ модели должно составлять ~10,5 м.

Задача решается в два этапа. На первом этапе рассчитывается начальное напряженное состояние массива, на втором этапе проходится выработка, устанавливается крепь (при допущении, что полость выработки образуется «мгновенно» и крепь устанавливается с минимальным технологическим отставанием от проходки) и рассчитывается новое равновесное состояние массива.

На рис.3-4 представлены некоторые результаты расчетов параметров напряженно-деформированного состояния массива. Из приведенных рисунков видно, что начальное поле напряжений имеет форму градиента с нулевым значением у поверхности и постепенным линейным увеличением напряжений с глубиной. Сооружение выработки вносит изменения в поле напряжений (рис.3).

Смещения горных пород в окрестности выработки незначительны. Деформации

---

* *Баклашов И.В.* Деформирование и разрушение породных массивов. М., 1988.

*Baklashov I.V.* Deformations and failure of rock masses. Moscow, 1988.

*Мозер С.П.* Горная геомеханика: физические основы и закономерности проявлений геомеханических процессов при подземной разработке месторождений / С.П.Мозер, Е.Б.Куртуков // СПб, 2009.

*Mozer S.P., Kurtukov E.B.* Rock mechanics: basic physics and mechanism of occurrence of geomechanical processes in underground mining. Saint Petersburg, 2009.

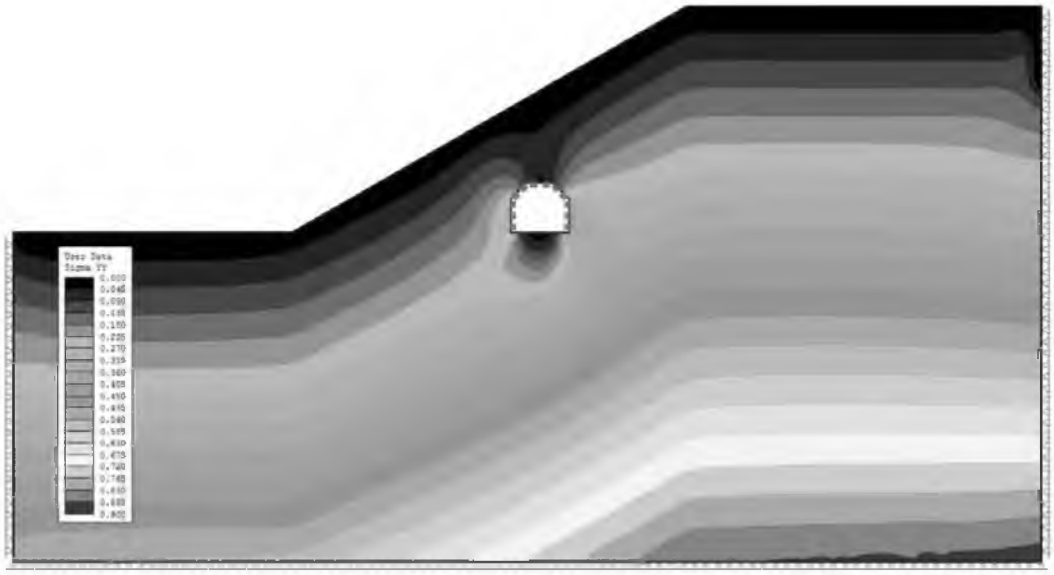


Рис. 3. Равновесное напряженное состояние массива после проходки выработки (вертикальные напряжения $\sigma_y$, МПа)

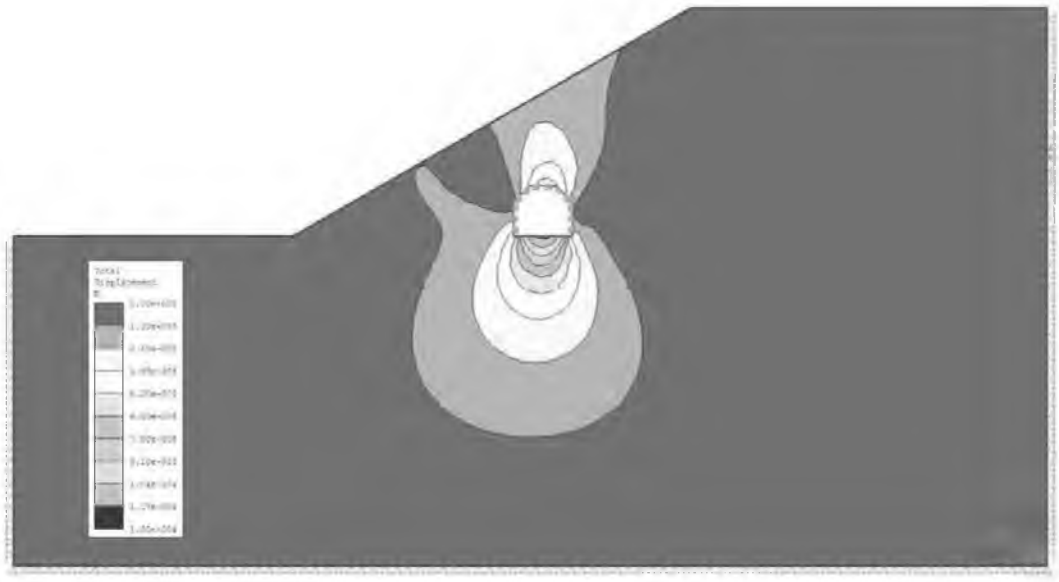


Рис.4. Смещения массива в окрестности выработки (общие смещения δ, м)

массива не выходят за пределы упругости. Выработка не оказывает влияния на устойчивость близкорасположенного склона (рис.4).

Максимальные усилия в бетонной обделке достигают 0,09 МН, максимальный момент – около $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ МН·м. Запас прочности (отношение эффективных напряжений в элементах к их прочности) во всем массиве выше единицы. Наименьшие его значения – в глубине склона, где сказывается влияние выработки и повышенного напряженного состояния от веса вышележащих пород.

Применение МКЭ в оценке устойчивости подземных сооружений значительно расширяет спектр решаемых задач и позволяет получать удобные для интерпретации результаты.