УДК 622.26

Е.Р.КОВАЛЬСКИЙ, *канд. техн. наук, ассистент, e.r.kovalsky@gmail.com*
С.П.МОЗЕР, *канд. техн. наук, доцент, mozer1@yandex.ru*
М.А.КАРАСЕВ, *канд. техн. наук, ассистент, blind2006@mail.ru*
Н.И.КОСУХИН, *студент, kola470@mail.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.KARASEV, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, blind2006@mail.ru*
N.I.KOSUKHIN, *student, kola470@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ХАРАКТЕР СМЕЩЕНИЙ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ ВЫРАБОТКИ

Получена зависимость смещения контура выработки от расстояния до забоя, позволяющая рассчитывать нагрузки на крепь с учетом отставания работ по креплению от проходческих работ. Приведены некоторые результаты расчета осевых усилий в элементах крепи. Расчеты выполнены методом конечных элементов в трехмерной постановке.

Ключевые слова: крепление, метод конечных элементов, смещения.

ROCK DISPLACEMENTS IN THE VICINITY OF THE FACE OF THE UNSUPPORTED EXCAVATION

The relationship between displacements of the excavation contour and distance to the excavation face is obtained in the paper. The relationship allows to calculate support pressure with the account for delay of the support installation. Some calculation results of axial forces in the support are given. Calculations are made on the basis of finite-element method with three dimensional models.

Key words: support, finite element method, displacements.

Важнейшим вопросом при проектировании подземных выработок является выбор типа и параметров крепления (временного и постоянного). Установка крепи при строительстве подземной выработки происходит с некоторым отставанием от проходческого забоя, которое зависит от технологии ведения работ и установки крепи, а также устойчивости пород кровли. При этом величина нагрузки, приходящейся на крепь, определяется, в числе прочих факторов, величиной смещения вмещающих пород, произошедших с момента подвигания забоя до момента установки крепи.

В связи с этим при обосновании типа и параметров крепи выработок важной задачей является определение характера смещений вмещающих пород в призабойной зоне проходимой выработки (т.е. в той зоне, где непосредственно происходит установка крепи) и выявление зависимости смещения контура выработки от расстояния до забоя.

Такие данные можно получить либо по результатам натурных исследований, что является достаточно трудоемким процессом, либо по результатам решения задачи о проходке тоннеля в объемной постановке на основе применения численных методов (в част-

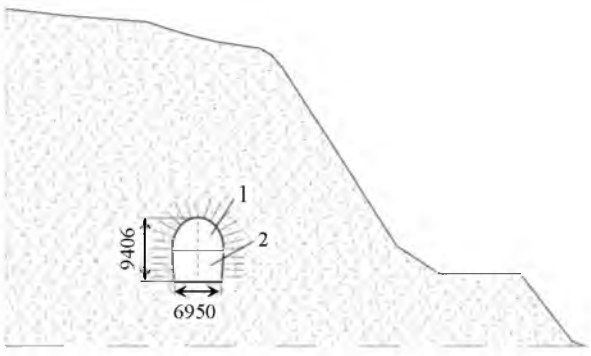


Рис.1. Схематичный разрез исследуемой выработки, иллюстрирующий сложный профиль поверхности
1 – калотта; 2 – штросса

ности, метода конечных элементов), позволяющих учитывать широкий спектр влияющих факторов.

Полученная зависимость смещений вмещающего массива от расстояния до забоя используется при расчете нагрузок на крепь при определении так называемых компенсирующих сил, прикладываемых в процессе расчетов к контуру тоннеля и позволяющих учесть отставание установки крепи от забоя.

Рассматриваемая задача решена для тоннеля большого сечения ($S_{св}$ = 65,0 м^2), расположенного в непосредственной близости от земной поверхности, имеющей сложный профиль. Тоннель проходится в две стадии, временная крепь состоит из комбинации набрызгбетона и стальных анкеров. Расстояние от кровли выработки до верхней поверхности ~27 м, кратчайшее расстояние от контура тоннеля до точки на поверхности склона ~21 м. Породы вмещающего массива представлены переслаиванием мергелей известковых и глинистых, песчаников известковых.

Технология проведения выработки состоит из следующих основных этапов. Производится разработка верхней (калоттной) части выработки (рис.1) на полное сечение на величину заходки. Затем на некотором расстоянии от забоя выработки устанавливается набрызгбетонная и металлическая анкерная крепь. После разработки калоттной части на величину заходки начинают разработку нижней (штроссовой) части выработки. Затем, так же как и в калотте, с некоторым отставанием от забоя производят установку крепи в штроссовой части. Далее цикл повторяется.

На рис.2 представлена конечно-элементная модель горного массива, в котором осуществляется проведение рассматриваемого тоннеля. Геометрические параметры модели соответствуют данным геологического разреза рассматриваемого участка строительства. Вдоль трассы тоннеля геометрия модели не меняется, вследствие незначительного изменения профиля горного массива. Задача решается в объемной постановке при следующих граничных условиях. Низ модели закреплен в вертикальном направлении (по оси y). Боковые поверхности, перпендикулярные оси тоннеля, закреплены по оси z. Боковые поверхности, параллельные оси тоннеля закреплены по оси x. Верхняя поверхность модели оставлена свободно деформируемой. Длина модели в продольном направлении 60 м. Начальное поле напряжений является гравитационным.

Задача решается в упругой постановке. Такая постановка в данном случае является оправданной: характер и величина смещения контура тоннеля определяются до момента установки крепи, и, как следствие, возникновения значительных пластических деформаций или появления зон запредельного деформирования не наблюдается, соответственно, смещения определяются уравнениями линейного деформирования материала (законом Гука). Выемка массива моделируется обнулением жесткости элементов той части модели,

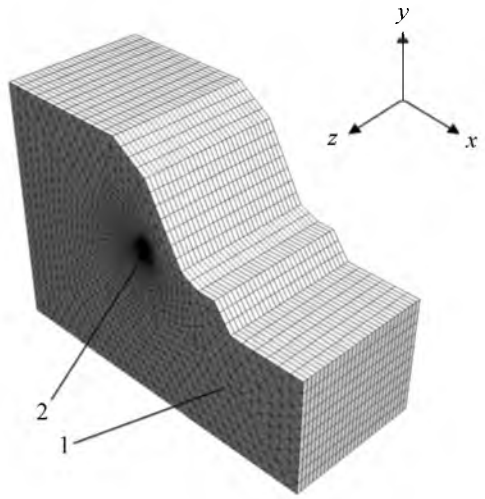


Рис.2. Конечно-элементная модель горного массива
1 – массив горной породы; 2 – участок горного массива, в котором сооружается тоннель с более мелкой сеткой элементов

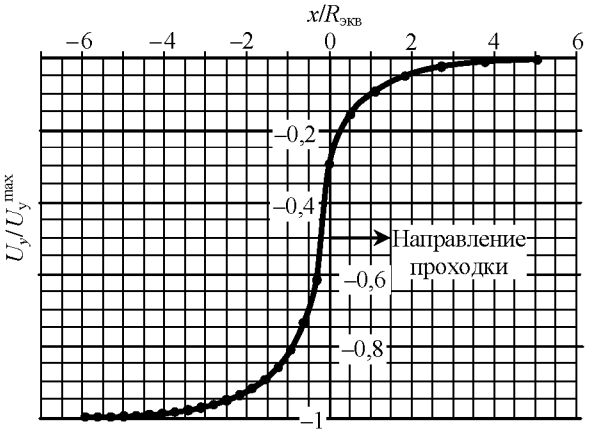


Рис.3. Характер смещений вмещающего массива на уровне кровли выработки

U_y – расчетные вертикальные смещения массива в текущей точке; U_y^{max} – максимальные расчетные вертикальные смещения массива на удалении от забоя; x – координаты текущей точки; $R_{экв}$ – эквивалентный радиус выработки

где производится выемка, и приложением эквивалентных сил к узлам конечных элементов, которые связаны (граничат) с элементами с нулевой жесткостью.

По результатам решения задачи в объемной постановке, в которой рассматривался процесс проходки калоттной части тоннеля без установки крепи, получена зависимость смещения кровли выработки от расстояния до забоя, продвигающегося вперед по мере ведения проходческих работ (рис.3). В целях универсализации результатов смещения кровли и расстояние до забоя нормированы соответственно на максимальные расчетные смещения кровли U_y^{max} и эквивалентный радиус выработки $R_{экв}$, определяемый из соотношения

$$R_{экв} = 0{,}564\sqrt{S},$$

где S – площадь поперечного сечения выработки, м^2.

Как видно из приведенного графика (рис.3), вертикальные смещения вмещающих пород на уровне кровли регистрируются на расстоянии до ~$6R_{экв}$ впереди выработки и достигают примерно трети от конечного значения непосредственно у груди забоя. В пределах выработки бóльшая часть смещений кровли выработки реализуется в зоне 2-3$R_{экв}$ от груди забоя и достигает маскимума на расстоянии ~$6R_{экв}$ за забоем.

В рассматриваемом примере технология проведения тоннеля предполагает, что отставание установки крепи от забоя не превышает 1 м. Согласно результатам расчетов, на расстоянии 1 м от забоя выработки смещения реализуются на ~45 %, т.е. на крепь тоннеля приходится только 55 % от первоначальной нагрузки. Именно такое значение компенсирующих сил задается в расчетах при определении нагрузки на крепь.

С учетом построенной кривой смещений пород в призабойной части выработки проведены расчеты усилий, развивающихся в элементах крепи. Параметры крепи и вмещающего массива приняты согласно горно-геологическим условиям заложения рассматриваемого тоннеля.

Эпюры осевых усилий в элементах бетонной крепи и анкерах на момент полного раскрытия сечения тоннеля приведены на рис.4, *а*.

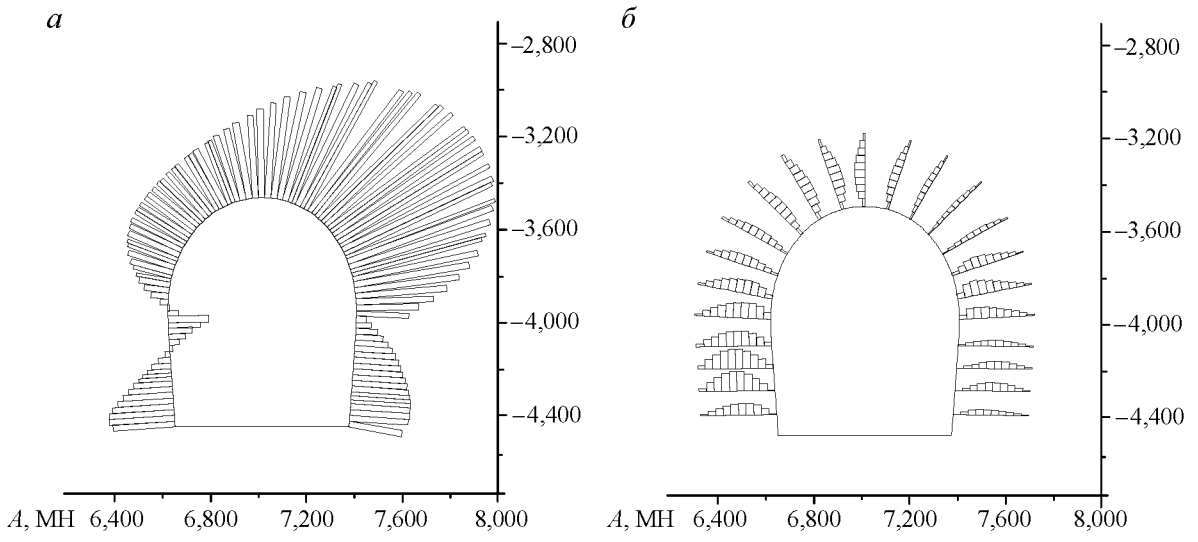


Рис.4. Осевые усилия в элементах бетонной крепи (*а*) и в анкерах (*б*)

Анализ характера распределения усилий в бетонной крепи показывает, что на последнем этапе раскрытия сечения тоннеля максимальное значение сжимающих усилий достигает 0,7 МН, растягивающих – 0,15 МН. Растягивающие усилия в крепи формируются на участке перехода калоттной части в штроссовую со стороны, противоположной склону. Максимальные усилия сжатия в бетонной крепи наблюдаются в боку калотты, обращенной к склону.

Осевые усилия в анкерах достигают наиболее высоких значений со стороны тоннеля, противоположной склону, и составляют 0,24 МН.

Полученный характер кривой вертикальных смещений хорошо коррелируется с натурными данными, полученными авторами работы [1] и обобщенными в работах [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chern J.C., Shiao F.Y.*, and *Yu C.W.* An empirical safety criterion for tunnel construction. // Proc. Regional Symp. on Sedimentary Rock Engeneering. Taipei, Taiwan, 20-22 November, 1998.

2. *Hoek E.* Tunnel support in weak rock // Proc. Regional Symp. on Sedimentary Rock Engeneering. Taipei, Taiwan, 20-22 November, 1998.

3. *Hoek E.* Support for very weak rock associated with faults and shear zones // Proc. International Symposium on Rock Support and Reinforcements Practice in Mining. Kalgoorlie, Australia, 14-19 March, 1999.