

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор, тел. 328-82-25*

Д.Н.ПЕТРОВ, *ассистент, petrovgs@mail.ru*

М.Г.ПОПОВ, *аспирант, mice8@yandex.ru*

Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

A.G.PROTOSENYA *Dr. in eng. sc., professor, tel. 328-82-25*

D.N.PETROV, *assistant lecturer, petrovgs@mail.ru*

M.G.POPOV, *post-graduate student, mice8@yandex.ru*

Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ, ПЕРЕСЕКАЮЩЕЙ ЗОНУ ОСЛАБЛЕНИЯ

По геологическим данным, полученным на Яковлевском месторождении, была разработана пространственная модель, предусматривающая проходку ортовой выработки через зону ослабления.

В ходе анализа напряженно-деформированного состояния вокруг выработки были выявлены характер распределения и численные значения тангенциальных и продольных напряжений. Установлено, что зона ослабления существенно влияет на распределение напряжений и перемещений вокруг выработки. При выборе параметров крепи необходимо учитывать наличие ослаблений и контактов в рудном массиве и расстояние до этих зон.

Ключевые слова: выработка, руда, зона ослабления, моделирование, напряжения, смещения, забой.

MODELING OF THE VOLUMETRIC STRESS-STRAIN CONDITION OF THE ROCK MASSIVE IN THE NEAR MINE WHICH ARE CROSSING ZONE OF WEAKENING

According to geological data which was received at the Yakovlevsky deposit, the volumetric model was developed. This model taking into consideration the driving of the mine through zone of weakening.

During the analysis of the stress-strain condition near the mine the character of distribution and numerical results of tangential and longitudinal stresses have been revealed. The zone of weakening affects to the distribution of stresses and displacements around the mine. To select the parameters of the lining support it is necessary to take into consideration weakenings and contacts in the ore massive and the distance for these zones.

Key words: mine, ore, zone of weakening, modeling, stress, displacement, face.

При строительстве горных выработок различного назначения в слоистых и неоднородных массивах при наклонном залегании пород необходимо прогнозировать напряженно-деформированное состояние массива вокруг штреков и ортов, находящихся вблизи или пересекающих зону ослабления.

Указанные пространственные задачи не имеют точных аналитических решений, поэтому применялось математическое мо-

делирование, основанное на методе конечных элементов.

Модель представляет собой участок линейно деформируемого рудного массива размером 50×80×40 м с выработкой сводчатого очертания, проведение которой осуществляется постадийно вкрест зоны ослабления (рис. 1). Шаг заходки принят равным 2 м.

Размеры модели подбирались из незначительности влияния граничных условий на

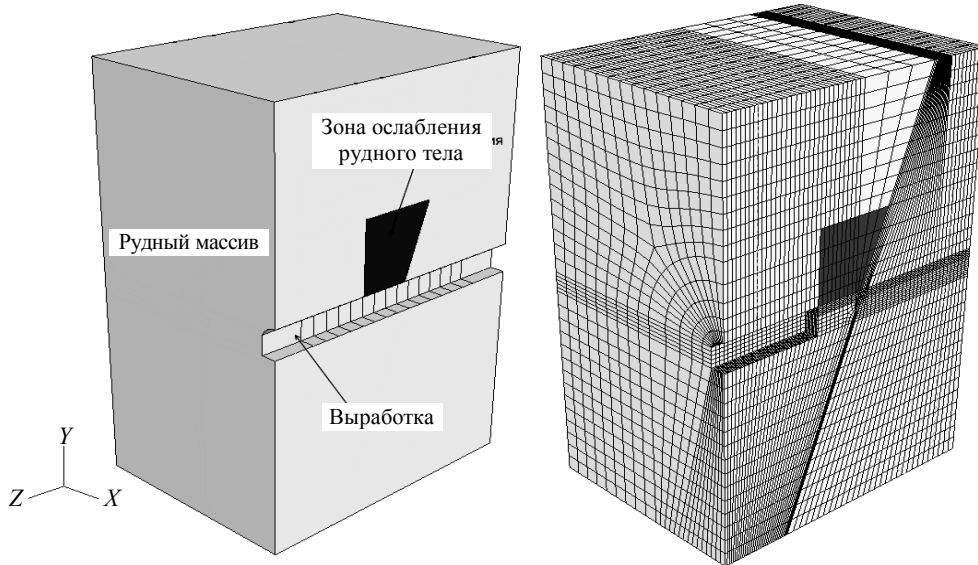


Рис.1. Конечно-элементная модель массива пород в выработкой

картину распределения напряжений и деформаций. Зона ослабления смоделирована таким образом, что она является составной частью массива, но с другими деформационными свойствами. Модуль деформации рудного массива принят равным $1,3 \cdot 10^3$ МПа, в зоне ослабления – $0,3 \cdot 10^3$ МПа. Коэффициент Пуассона 0,37.

Граничные условия задавались следующим образом: боковым граням запрещались перемещения по оси Z , нижней грани – по оси Y , торцевым граням – по оси X . Зона ослабления расположена посередине трассы выработки, за счет этого можно судить о изменении напряжений до и после ослабления (рис.1).

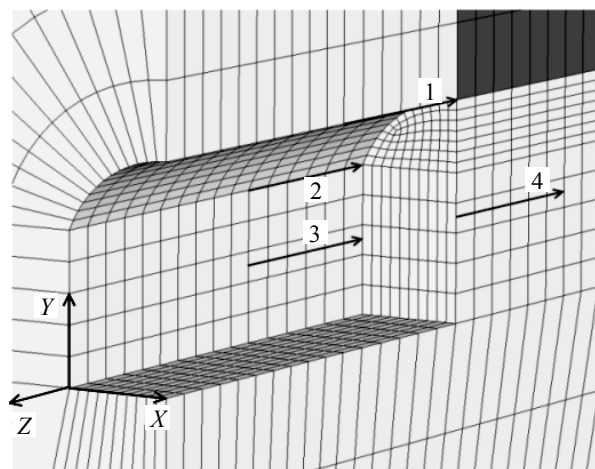


Рис.2. Фрагмент сетки конечных элементов 1-4 – направления, вдоль которых оценивались напряжения в массиве

Напряженное состояние определялось исходя из того, что выработка расположена на глубине 500 м и задавалась полем напряжений, распределенным по всему объему вмещающего массива, с составляющими

$$\sigma_x = \sigma_z = \lambda \gamma H, \sigma_y = \gamma H, \quad (1)$$

где γ – удельный вес пород; H – глубина заложения выработки; λ – коэффициент бокового распора пород, определяемый по формуле

$$\lambda = \operatorname{tg}^2 \frac{90 - \varphi}{2}, \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения.

Тогда вертикальные напряжения в массиве $\sigma_y = 10$ МПа, а горизонтальные $\sigma_x = \sigma_z = 7$ МПа.

Модель разбивалась на 108000 объемных 8-узловых элементов, размер которых в районе выработки составлял 0,2 м, а по мере удаления увеличивался и на границах модели доходил до 2 м.

В результате расчетов были получены картины распределения напряжений в массиве пород перед забоем выработки в трех положениях проходки. Рассмотрим распределение вертикальных напряжений вдоль трассы выработки по четырем направлениям: на уровне шельги свода, пяты свода, середины бока выработки и по центру оси выработки (рис.2).

По оси абсцисс будем откладывать расстояние L таким образом, что начало оси

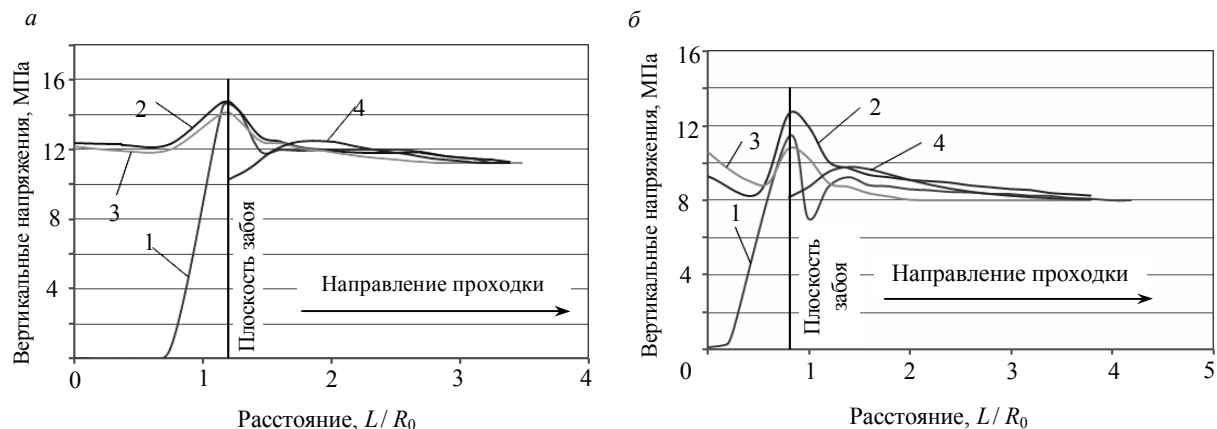


Рис. 3. Вертикальные напряжения в массиве пород в призабойной зоне перед ослаблением (а) и на участке ослабления (б)

1 – шельга свода; 2 – пята свода; 3 – середина бока; 4 – центр забоя

будет находиться перед забоем, далее ось будет пересекать плоскость забоя и уходить в глубь массива.

Вертикальные напряжения по четырем направлениям в массиве пород до зоны ослабления и в зоне ослабления приведены на рис.3.

Анализ распределения вертикальных напряжений в пяте свода и в середине бока выработки показывает, что они изменяются аналогичным образом на всем рассматриваемом расстоянии, незначительно отличаясь по величине, кроме участка ослабления.

В пяте свода перед забоем напряжения составляют $\sigma_v = 12,28$ МПа, $\sigma_v = 9,4$ МПа. По мере приближения к забою напряжения меняются незначительно, достигая местного минимума, и на расстоянии $0,5 R_0$ от плоскости забоя достигают значений $\sigma_v = 12,0$ МПа, $\sigma_v = 8,22$ МПа, далее интенсивно возрастают и в плоскости забоя достигают максимума: $\sigma_v = 14,6$ МПа, $\sigma_v = 12,9$ МПа. Средний радиус выработки

$$R_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (3)$$

где S – площадь поперечного сечения выработки.

В середине бока в зоне ослабления вертикальные напряжения перед забоем на расстоянии $0,85R_0$ составляют $\sigma_v = 10,6$ МПа, в плоскости забоя – $\sigma_v = 10,65$ МПа. Далее напряжения падают и на расстоянии $2,0R_0$ впереди забоя $\sigma_v = 8,0$ МПа. Также можно

отметить, что в плоскости забоя вертикальные напряжения после ослабления меньше на 0,5 МПа этих же напряжений перед ослаблением.

В верхней части выработки (шельге) перед забоем напряжения близки к нулевым. Далее напряжения увеличиваются, и на расстоянии $0,5R_0$ от забоя скорость увеличения сжимающих напряжений резко возрастает, достигая максимума в плоскости забоя соответственно $\sigma_v = 14,5$ МПа, $\sigma_v = 11,6$ МПа.

При продвижении в глубь массива значения напряжений падают и на расстоянии $0,37R_0$ от плоскости забоя достигают локального минимума: $\sigma_v = 11,85$ МПа, $\sigma_v = 7,01$ МПа. Для зоны ослабления характерен участок увеличения напряжений на расстоянии $0,5R_0$ от плоскости забоя в глубь массива, где $\sigma_v = 9,42$ МПа. При удалении от забоя напряжения стремятся к фоновым значениям.

Вертикальные напряжения на уровне центра оси выработки в плоскости забоя составляют $\sigma_v = 10,2$ МПа, $\sigma_v = 8,1$ МПа. Далее монотонно возрастают, достигая максимума на расстоянии $0,9R_0$ от забоя $\sigma_v = 12,42$ МПа, $\sigma_v = 9,78$ МПа. На расстоянии $2,5R_0$ от плоскости забоя они стремятся к фоновым напряжениям.

В ходе анализа закономерностей распределения напряжений вокруг выработки были выявлены характер изменения и численные значения коэффициентов концен-

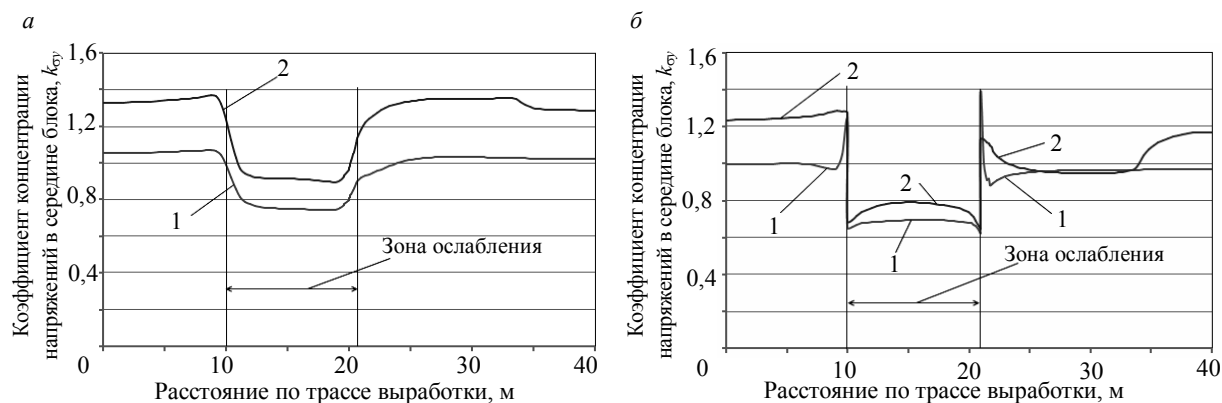


Рис.4. Коэффициент концентрации вертикальных напряжений в середине бока (а) и горизонтальных напряжений в своде (б) выработки и по ее трассе

1 – в нетронutom массиве; 2 – после проходки выработки

трации напряжений в середине бока и в своде выработки вдоль ее трассы. Установлено, что зона ослабления существенно влияет на распределение напряжений вокруг выработки, а также впереди забоя при приближении к участку нарушения рудного массива.

Рассмотрим распределение напряжений в массиве после проведения выработки. На рис.4, а приведено изменение коэффициента концентрации вертикальных напряжений в середине бока выработки по сравнению с их величинами для нетронutom массива. Коэффициенты концентраций вертикальных напряжений $k_{\sigma_y} = \sigma_y/p$, для горизонтальных напряжений $k_{\sigma_x} = \sigma_x/\lambda p$. Анализируя полученные результаты, приходим к следующим выводам. Коэффициенты концентрации в нетронutom рудном массиве до и после проходки выработки имеют одинаковый характер изменения, но различны по значениям. Перед зоной ослабления средние значения для нетронutom массива $k_{\sigma_y} = 1,09$ и после проходки выработки $k_{\sigma_y} = 1,39$. В зоне ослабления значения k_{σ_y} снижаются и достигают минимума: $k_{\sigma_y} = 0,78$ и $k_{\sigma_y} = 0,92$. Далее резко возрастают до границы зоны ослабления с рудным массивом, затем происходит более плавное увеличение значений: $k_{\sigma_y} = 1,05$ и $k_{\sigma_y} = 1,34$.

Закономерности изменения коэффициента концентрации горизонтальных напряжений в своде выработки по сравнению со значениями в нетронutom массиве (рис.4, б) существенно отличаются.

Перед зоной ослабления средние значения для нетронutom массива $k_{\sigma_y} = 1,0$ и после

проходки выработки $k_{\sigma_y} = 1,22$. При входе в зону ослабления происходит резкий спад k_{σ_x} до значений 0,65 и 0,68 соответственно. В зоне ослабления коэффициенты концентрации мало изменяются и среднее значение $k_{\sigma_x} = 0,7$ и $k_{\sigma_x} = 0,75$. На границе зоны ослабления с рудным массивом происходит скачок: $k_{\sigma_x} = 1,4$ и $k_{\sigma_x} = 1,12$ соответственно. В нетронutom массиве через 1,5 м после контакта коэффициент концентрации снижается до $k_{\sigma_x} = 0,9$, затем происходит более плавное увеличение значений до уровня фоновых напряжений. Вследствие проходки выработки локальный минимум отсутствует, коэффициент концентрации постепенно снижается до $k_{\sigma_x} = 0,98$.

По результатам расчета также были построены графики зависимости напряжений от расстояния при поэтапной проходке вдоль выработки. За нулевую координату по оси X был принят забой выработки, а увеличение значений соответствует приближению к зоне ослабления.

Рассмотрим распределение вертикальных напряжений на уровне свода на трех этапах проходки выработки (рис.5). Зависимости вертикальных напряжений ведут себя аналогичным образом на всем рассматриваемом расстоянии, отличаясь по величине в призабойной зоне.

В плоскости забоя напряжения достигают за 4 м $\sigma_b = 14,3$ МПа, за 2 м $\sigma_b = 15,7$ МПа и перед самым нарушением $\sigma_b = 20,1$ МПа. При продвижении в глубь массива значения напряжений падают и на

расстоянии $0,4R_0$ от плоскости забоя достигают локального минимума для зависимостей №1 $\sigma_{\theta} = 11,85$ МПа и №2 $\sigma_{\theta} = 12,05$ МПа. При входе в зону ослабления характерен спад напряжений до $\sigma_{\theta} = 6,2$ МПа.

По результатам моделирования были также построены зависимости (рис.6) тангенциальных напряжений, возникающих на контуре выработки. Слева показаны зависимости, полученные при поэтапной проходке выработки, справа – эти же зависимости, но после проходки выработки на полную длину.

Анализируя правую и левую часть графика, можно отметить схожий характер кривых, отличия будут только в значении напряжений. Для зоны ослабления значения напряжений перед забоем почти совпадают со значениями после проходки.

Отличия наблюдаются для участков до нарушения и после него. Сначала рассмотрим характер распределения напряжений перед нарушением. Перед забоем в шельге свода напряжения $\sigma_{\theta} = 7,8$ МПа. После проходки выработки эти напряжения возрастают до 8,9 МПа. На уровне пяты свода напряжения перед забоем и после полной проходки соответственно составляют $\sigma_{\theta} = 11,95$ МПа и $\sigma_{\theta} = 13,8$ МПа. Это значит, что после проходки выработки на полную длину напряжения увеличились в среднем на 15 %.

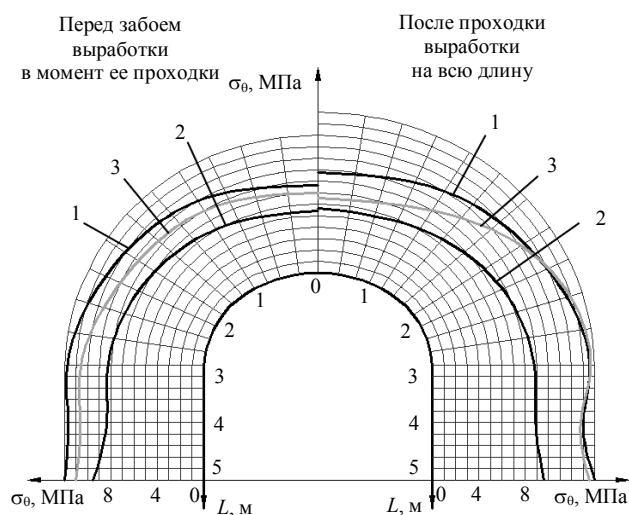


Рис.6. Тангенциальные напряжения на контуре выработки
1 – перед нарушением; 2 – на участке нарушения;
3 – после нарушения

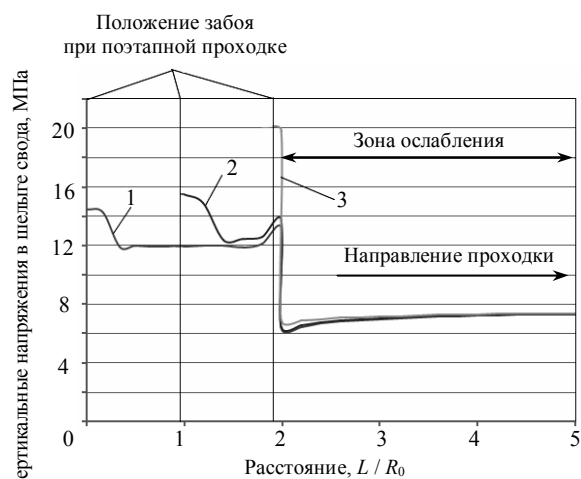


Рис.5. Вертикальные напряжения на уровне свода выработки впереди забоя при поэтапной проходке
1 – за 4 м до нарушения; 2 – за 2 м до нарушения;
3 – перед нарушением

Для участка после нарушения напряжения так же максимальны, когда выработка полностью пройдена. Здесь напряжение возрастает в среднем на 20 % по сравнению со значениями, полученными на стадии проходки перед забоем. Но это справедливо только для боков выработки. В сводовой части картина другая: напряжения совпадают, за исключением шельги свода, где напряжения перед забоем составляют $\sigma_{\theta} = 8,01$ МПа, а после проходки выработки – снижаются до

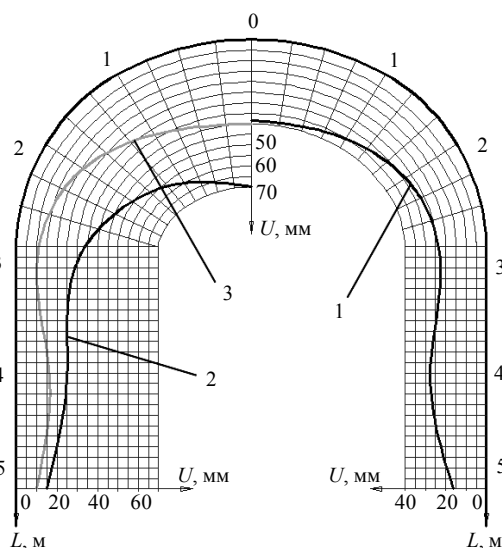


Рис.7. Смещения контура выработки
1 – перед нарушением; 2 – на участке нарушения;
3 – после нарушения

7,52 МПа. Это можно объяснить тем, что в модели при выходе из зоны ослабления над выработкой происходит наклонный контактный слой с углом падения 70° , который оказывает влияние на распределение напряжений.

Рассмотрим формирование радиальных смещений контура выработки под действием поля напряжений в массиве пород после проходки выработки на полную длину (рис.7). Смещения находились путем вычитания смещений модели из полных, получаемых при завершении проходки выработки. В итоге получаем смещения контура выработки, вызванные только самими горными работами.

Радиальные смещения перед и после нарушения схожи по характеру распределения, отличаются друг от друга только значениями. В шельге свода получаем максимальные смещения $U_p = 36,0$ мм и $U_p = 38,5$ мм соответственно для участков до и после нарушения.

Затем смещения несколько уменьшаются. На уровне пяты свода они составляют $U_p = 22,3$ мм и $U_p = 11,1$ мм. Далее наблюдается увеличение смещений, которые на уровне середины бока достигают значений $U_p = 27,2$ мм и $U_p = 16,7$ мм. По мере приближения к почве выработки смещения убывают.

На участке нарушения существенные отличия просматриваются в сводовой части выработки. Так, в шельге свода смещения достигают $U_p = 70,0$ мм. Затем смещения плавно уменьшаются, и на уровне пяты свода они составляют $U_p = 30,3$ мм. Далее также происходит постепенное уменьшение, а на уровне почвы смещения составляют $U_p = 15,2$ мм.

Выявленные закономерности изменения напряжений и перемещений при пересечении ортовой выработкой сводчатой формы зоны ослабления могут быть использованы для выбора типов и параметров ее крепи.