УДК 622.284

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор, (812) 328 82 25*
Н.А.БЕЛЯКОВ, *аспирант, nike-bel@yandex.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

A.G.PROTOSENYA, *Dr. in eng. sc., professor, (812) 328 82 25*
N.A.BELYAKOV, *post-graduate student, nike-bel@yandex.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА С ВЫРАБОТКОЙ КРУГОВОГО ОЧЕРТАНИЯ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ

Проведен анализ упрочняющего эффекта от применения анкерного крепления, используемого при проходке транспортных тоннелей в условиях Северного Кавказа. Методом конечных элементов определено изменение напряженно-деформированного состояния породного массива, ослабленного выработкой кругового очертания. На основании выполненного моделирования построен ряд графических зависимостей, описывающих изменение размеров зон предельного состояния в зависимости от прочностных и деформационных свойств горных пород, слагающих массив. По результатам работы намечено направление дальнейших исследований.

***Ключевые слова*:** тоннель, напряжения, деформация, смещения, предельное состояние, анкер, моделирование.

THE DETERMINATION OF THE VOLUME STRESS-STRAIN CONDITIONS OF THE ROCK MASSIVE WITH THE CIRCULAR OUTLINE MINING ENSRINED WITH THE ANCHORS

In the article the analysis of consolidating effect from application of the anchor fastening, which using at driving of transport tunnels in the conditions of North Caucasus is produced. The change of the stress-strain condition of the rock massive, which is weaked by the mining of the circular outline is certain with the finite-elements method. On the basis of the executed design the row of graphic dependences, which describes changing of the sizes of limitary areas depending on strength and deformational properties of the rocks. Due to results of the conducted work the direction of further researches is seted.

***Key words*:** tunnel, stresses, deformations, displacements, limitary condition, anchor, modeling.

Современная технология проведения транспортных тоннелей в слабых породах и при пересечении участков тектонических нарушений, как правило, предусматривает применение анкеров. В связи с этим возникает необходимость в исследовании упрочняющего эффекта от применения анкеров, особенно на участках тоннелей, проводимых по слабым породам в зонах тектонических нарушений.

Для исследования названного упрочняющего эффекта была составлена математическая модель породного массива, ослабленного проведенной в нем выработкой кругового очертания диаметром 9,4 м. Такое значение диаметра выработки было найдено, исходя из ее площади, эквивалентной по своему значению средней площади железнодорожного тоннеля.

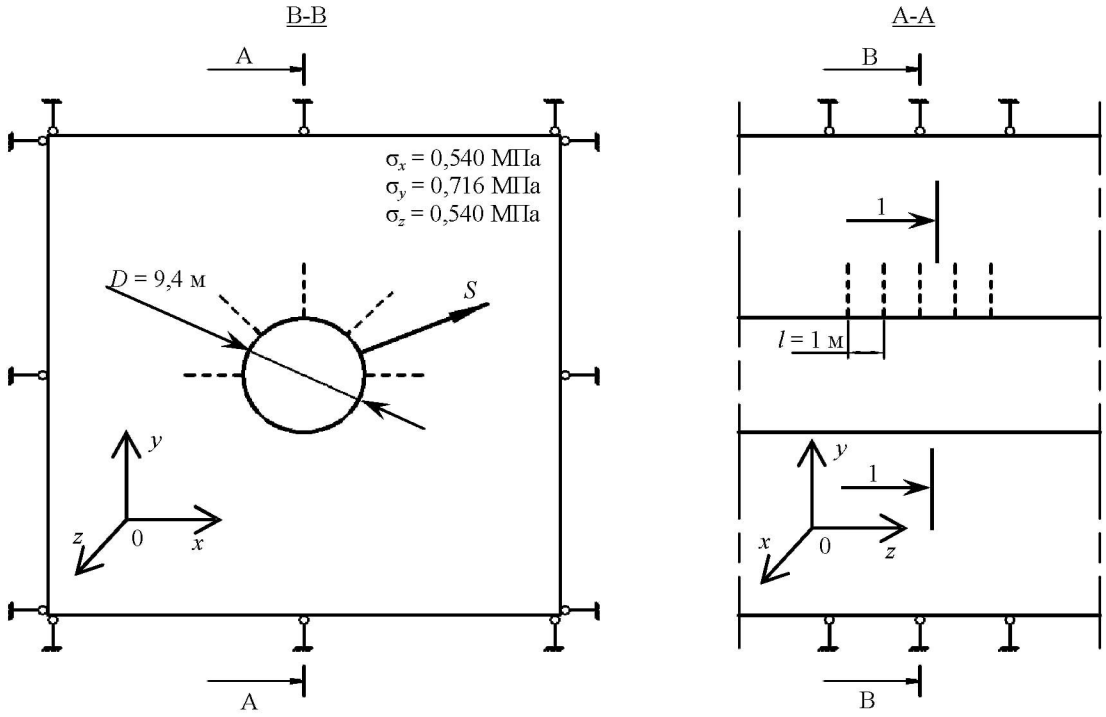

Рис.1. Принципиальная расчетная схема: *S* – направление анализа; 1-1 – исследуемое сечение

Принципиальная расчетная схема, положенная в основу конечно-элементной модели, представлена на рис.1. Из схемы ясно, что во вмещающем выработку массиве создавалось начальное неравнокомпонентное поле напряжений, вычисленное с учетом веса вышележащего столба пород и возможной сейсмической нагрузки*.

Анализируемая в статье конечно-элементная модель представлена на рис.2. Размеры модели в направлении осей *x* и *y* превышают диаметр выработки примерно в девять раз. Задача решалась в объемной постановке. Границы модели закреплены по всем граням от перемещений в направлении соответствующих координатных осей. Решение задачи выполнялось в упруго-пластической постановке. Для учета влияния интенсивности проявления нарушенности породами, массиву задавались три различные величины сцепления (соответственно далее C_1, C_2 и C_3) и отслеживались изменения в размере зоны предельного состояния.

Для исследования упрочняющего эффекта от применения анкерного крепления были выбраны сталеполимерные анкеры. Выбор такого типа анкеров обусловлен их широкой распространенностью на практике при проведении транспортных тоннелей. Моделировались анкеры как объемные стержни, внедренные в породный массив и закрепленные в нем по всей длине по схеме, приведенной на рис.1.

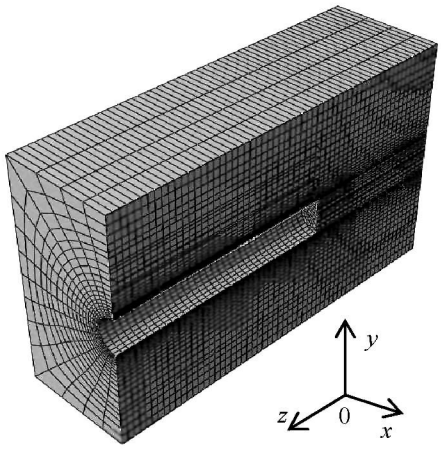

Рис.2. Фрагмент конечно-элементной модели

* *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1994. 382 с.

Bulichev N.S. Mechanics of the underground constructions: The textbook for higher schools. The second edition. M.: Nedra, 1994. 382 p.

При решении поставленной задачи использовалась следующая последовательность операций:

1. Решалась задача для случая незакрепленной выработки кругового очертания и по определенному направлению S (см. рис.1) определялся размер зоны предельного состояния и ее относительные характеристики. Для забоя выработки направлением вычисления служила ось выработки.

2. Решалась задача для случая выработки с участком, закрепленным сталеполимерными анкерами с общим количеством, равным 30, при этом количество анкеров в одном сечении составляло 5 (см. рис.1). Расстояние между анкерами в направлении оси z составляло 1 м. Далее выполнялись те же вычисления, что и для случая незакрепленной выработки (по направлению S в сечении 1-1).

Расстояние между участком выработки, закрепленным анкерами, и ее забоем выбиралось с таким расчетом, чтобы забой не оказывал влияния на работу анкерного крепления и, соответственно, наоборот. Это было необходимо для получения чистых показателей, характеризующих эффект упрочнения от применения названного способа крепления.

По результатам описанных вычислений был построен ряд графических зависимостей, которые впоследствии подвергались анализу.

Прочностные и деформационные характеристики пород материалов, которые были использованы при моделировании, представлены ниже:

Показатель	Значение
Породный массив	
Удельный вес	23,54 кН/м^3
Модуль общей деформации	300 МПа
Коэффициент поперечной деформации	0,35
Угол внутреннего трения	10 град.
Сцепление массива различной степени нарушенности	
1	0,25 МПа
2	0,2 МПа
3	0,12 МПа
Сталеполимерные анкеры из арматуры класса А-III	
Диаметр	40 мм
Длина	4,5 м
Модуль упругости	200 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,25

Следует отметить, что эти характеристики соответствуют тем условиям, которые встречаются при проходке транспортных тоннелей на участках зон тектонических нарушений, т.е. при моделировании рассматривались самые тяжелые условия проходки тоннелей, когда во вмещающем массиве возникают значительные по своей величине пластические деформации на контуре выработки.

На основании выполненного моделирования была построена зависимость величины радиальных пластических деформаций (equivalent plastic strain) от расстояния от контура выработки по направлению S (см. рис.1). Эта зависимость представлена на рис.3.

Как можно видеть из графической зависимости на рис.3, качественно кривые зависимости не изменяются в зависимости от величины сцепления. При этом кривые типа *а* соответствуют незакрепленной выработке, а кривые типа *б* – выработке, закрепленной сталеполимерными анкерами.

На основании приведенной зависимости можно сделать следующие выводы. Применение анкерной крепи позволяет уменьшить величину пластических деформаций на контуре выработки; чем ниже величина сцепления породы (т.е. чем сильнее проявляются ее пластические свойства), тем относительно более эффективно применение такого типа крепления. Кроме этого, установка анкеров в массив несомненно вызывает перераспределение полей напряжений и перемещений в нем, а в результате этого точка максимума деформаций передвигается с контура выработки внутрь самого массива на расстояние порядка 1 м. При этом это расстояние практически не зависит от величины сцепления породы.

Также на основании зависимости, представленной на рис.3, можно придти к выводу, что уменьшение размера зоны предельного равновесия, т.е. упрочняющий эффект тем значительней, чем больше эта зона без крепления, т.е. чем меньше величина сцепления. Так при $C = 0{,}25$ МПа уменьшение размера зоны предельного равновесия составит около 20 %, а при $C = 0{,}12$ МПа оно составит уже 38-40 %.

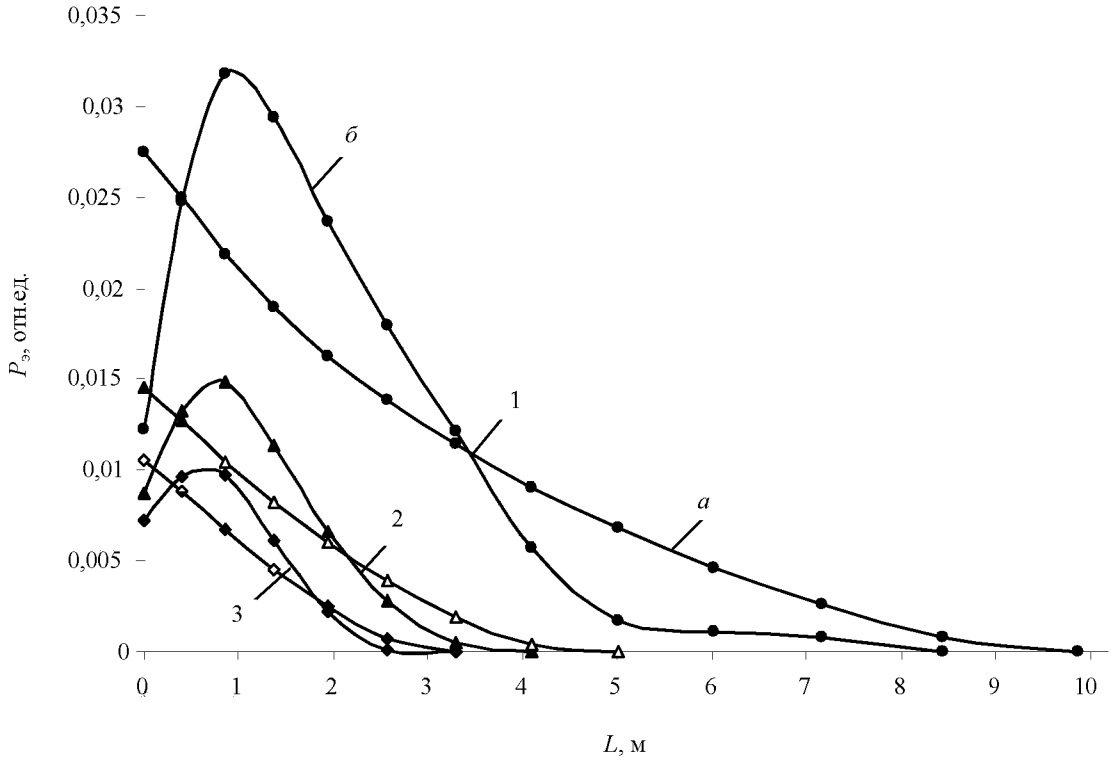

Рис.3. График зависимости радиальных пластических деформаций от расстояния от контура выработки по направлению S

1 – кривые при С = 0,12 МПа; 2 – кривые при С = 0,2 МПа; 3 – кривые при С = 0,25 МПа

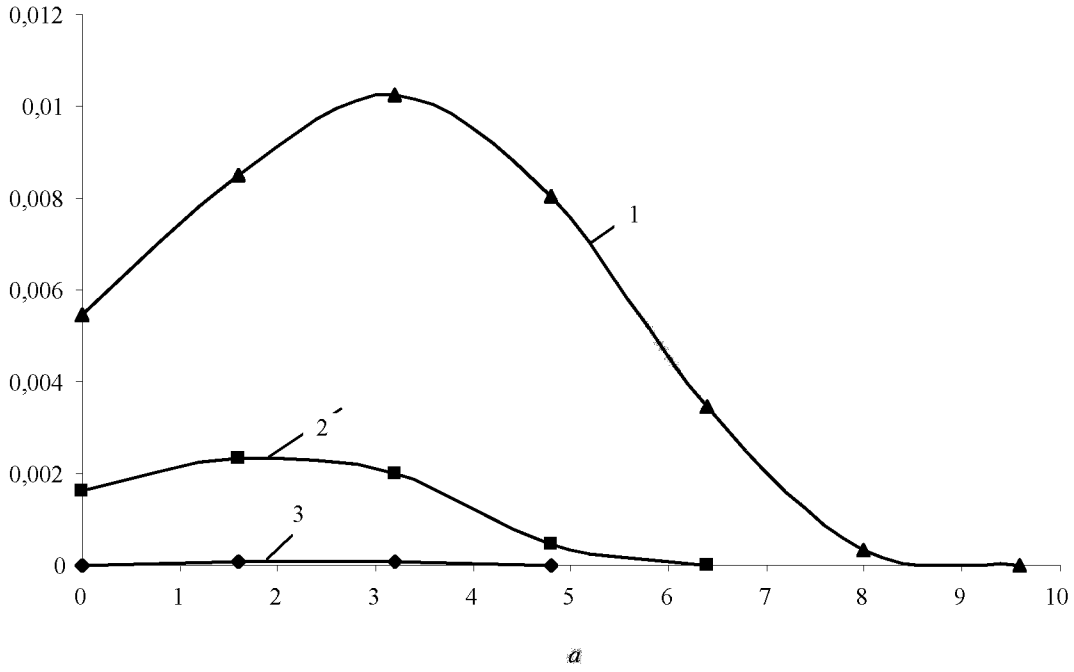

Рис.4. График зависимости продольных пластических деформаций впереди забоя от расстояния до его плоскости по оси выработки

1 – кривая при С = 0,12 МПа; 2 – кривая при С = 0,2 МПа; 3 – кривая при С = 0,25 МПа

По результатам моделирования также была построена зависимость продольных пластических деформаций впереди забоя в зависимости от расстояния до его плоскости по оси выработки (рис.4).

Анализируя приведенную графическую зависимость, можно отметить, что размер зоны предельного состояния в призабойной области значительно зависит от величины сцепления породы вмещающего массива. В общем случае можно сказать, что вблизи забоя формируется достаточно протяженная зона предельного состояния и плоскость забоя может быть неустойчивой. Следовательно, в подобных условиях необходимо предусматривать крепление проходческого забоя.

По результатам моделирования для наиболее нарушенного массива (при С = 0,12 МПа) были построены сравнительные эпюры распределения горизонтальных и вертикальных смещений контура выработки при условиях наличия и отсутствия анкерного крепления. Эти эпюры представлены на рис.5.

Из построенных эпюр можно сделать следующие выводы. Применение анкерного крепления позволяет уменьшить полные смещения контура выработки на величину до 30-50 %. Особенно значительно величина смещений уменьшается в боках выработки. Так, например, в представленном на рис.5 случае величина горизонтальных смещений для незакрепленной выработки составляет около 46 мм, а в случае закрепления анкерами – уже около 25 мм.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что за счет уменьшения смещений контура выработки применение анкерного крепления дает возможность уменьшить нагрузку на временную крепь, а в последующем и на постоянную обделку тоннеля.

На основании наблюдений за развитием смещений на контуре выработки и размерами зоны предельного состояния во вмещающем массиве при различных величинах сцепления стоит отметить, что при уменьшении значения величины сцепления происходит значительное возрастание величины горизонтальных смещений, при этом

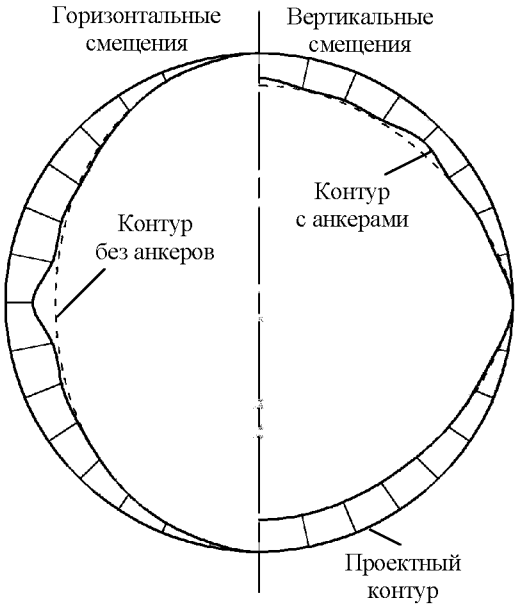

Рис.5. Эпюры распределения смещений контура выработки: сплошная линия – выработка с анкерами, пунктирная – без анкеров

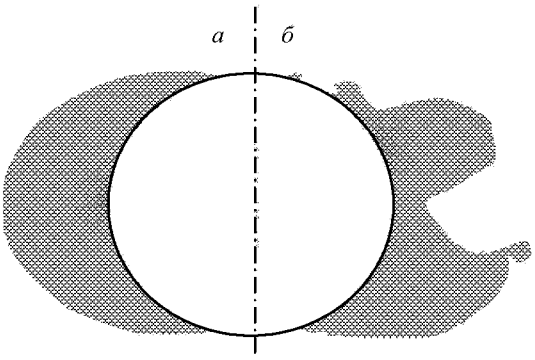

Рис.6. Формы зон предельного равновесия для незакрепленной выработки (*а*) и закрепленной (*б*) анкерами

вертикальные смещения практически не изменяются. Это можно объяснить формированием в боках выработки при малом значении сцепления значительных зон пластического состояния. Подтверждением этого факта являются полученные по результатам моделирования формы зон предельного равновесия, представленные на рис.6.

На основании сравнения форм зон предельного равновесия для случаев незакрепленной и закрепленной выработок можно сделать вывод о том, что применение анкерного крепления позволяет значительно

уменьшить размеры этой зоны, особенно в горизонтальном (т.е. наиболее критичном для данной ситуации) направлении.

Можно заключить, что применение анкерного крепления при проведении транспортных тоннелей является весьма эффективным решением с геомеханической точки зрения. При этом, что немаловажно, относительная эффективность применения анкеров тем выше, чем хуже условия проведения выработки.

Следует отметить, что затронутая в статье тема требует дальнейшего изучения. В частности, необходимо разработать математические модели для выработок некругового очертания, а также исследовать вопросы крепления проходческих забоев с помощью анкеров.