УДК 622.023

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор, (812) 328-86-25, kaf-sgp@mail.ru*
Н.А.БЕЛЯКОВ, *аспирант, nike-bel@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.PROTOSENYA, *Dr. in eng. sc., professor, (812) 328-86-25, kaf-sgp@mail.ru*
N.BELYAKOV, *postgraduate student, nike-bel@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

МЕТОД ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛОК ДВУХ ВЗАИМОВЛИЯЮЩИХ ТОННЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Приведено обоснование метода прогноза напряженно-деформированного состояния элементов временной крепи тоннелей, находящихся в зоне взаимного влияния, основанного на решении пространственной геомеханической задачи. Решение задачи выполнено с учетом технологии строительства тоннелей. Приведен анализ полученных результатов численного моделирования. На основании выполненного анализа намечены основные пути решения задач подобного класса.

Ключевые слова: тоннель, взаимное влияние, напряжение, смещение, крепь, обделка, штросса, калотта.

THE TECHNICS OF MUTUAL INFLUENCED TUNNEL'S TEMPORARY SUPPORT STRESS-STRAIN STATE PREDICTION WITH ALLOWANCE FOR BUILDING TECHNOLOGY

In the learned article the substantiation of the mutual influenced tunnel's temporary support elements stress-strain state prediction technics is adduced. The problem is sold in three-dimensional arrangement with allowance for building technology. The analysis of numerical simulation results is adduced. On account of this analysis the main ways of solution for such problem class is spotted.

Key words: tunnel, mutual influence, stress, strain, temporary support, permanent lining, stross, calotte.

Решение задачи прогноза напряженно-деформированного состояния крепей и обделок транспортных тоннелей, находящихся в зоне взаимного влияния, представляет интерес главным образом в двух аспектах. Во-первых, каким образом будут работать конструкции временной крепи при строительстве протяженных участков тоннелей в зоне взаимного влияния, т.е. каким образом будут формироваться напряжения в элементах временной крепи, и насколько они будут отличаться от этих же напряжений при строительстве тоннеля вне зоны взаимного влияния.

Во-вторых, насколько будет влиять расстояние между тоннелями на величину и распределение напряжений, возникающих в крепях и обделках тоннелей, и напряжений в межтоннельном целике.

Заметим, что для получения данных по отмеченным позициям рационально использовать разные численные модели. В первом случае очевидно, что модель должна быть выполнена в пространственной постановке (необходимо учесть технологию строительства тоннелей и сдерживающее влияние забоя); во втором случае можно использовать постановку плоской деформации.

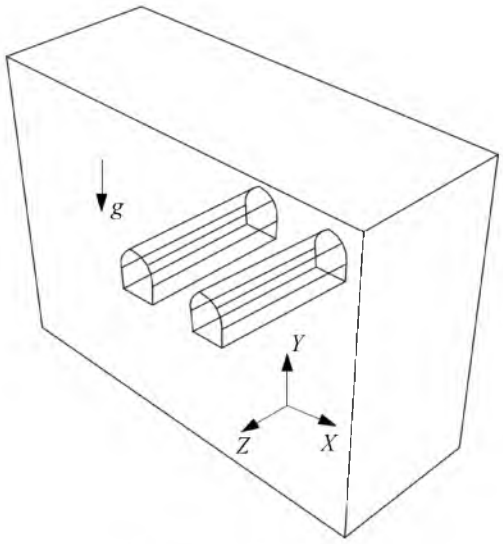


Рис.1. Расчетная схема

В рамках данной статьи ограничимся изучением первого обозначенного аспекта.

Для решения задачи прогноза формирования напряжений в конструкциях крепи тоннелей, расположенных в зоне взаимного влияния, была разработана пространственная численная модель. Расчетная схема, заложенная в разработанную пространственную конечно-элементную модель, представлена на рис.1.

Граничные условия заданы следующим образом: модели запрещались смещения по нижней грани – в направлении оси *Y*, по боковым граням – в направлении оси *X*, по торцевым граням – в направлении оси *Z*, верхняя грань модели оставлялась свободно деформируемой. Начальное поле распределения напряжений задавалось с учетом геостатического закона согласно гипотезе Динника с коэффициентом бокового давления, равным 0,4 (определяется, исходя из коэффициента Пуассона пород вмещающего массива).

Модель состояла из 140 расчетных шагов, на каждом из которых моделировалось выполнение работ по проходке и креплению тоннелей в очередной заходке. Отметим, что согласно разработанной модели в первую очередь выполняется строительство правого тоннеля, а затем – левого. В дальнейшем правый тоннель будем называть первым, левый – вторым. Расстояние между тоннелями принималось равным 10 м.

Модуль общей деформации и коэффициент поперечной деформации для пород вмещающего массива принимались равными соответственно 810 МПа и 0,38. Для материалов элементов крепи деформационно-прочностные показатели принимались в соответствии с нормативной литературой.

Рассмотрим полученные при моделировании результаты и выполним анализ формирования напряженного состояния в основных элементах временной крепи – в арках и черновом бетоне.

Вначале обратимся к анализу формирования напряженного состояния в стальных арках временной крепи. Для анализа процесса формирования напряженного состояния арок временной крепи первого тоннеля на различных этапах строительства в разработанной конечно-элементной модели был выделен участок, расположенный вне зоны влияния граничных условий. На этом участке была выделена одна арка, на которой были размещены характеристические точки, расположение которых приведено на рис. 2.

На рис.3 представлены графики развития нормальных тангенциальных напряжений в арке временного крепления по мере выполнения проходки тоннеля.

Анализируя полученные зависимости, необходимо отметить следующее. На этапе раскрытия сечения первого тоннеля рост напряжений в арках, с поправкой на абсолютные значения, связанные с разными глубинами заложения, и отсутствием влияния рельефа земной поверхности, происходит аналогично

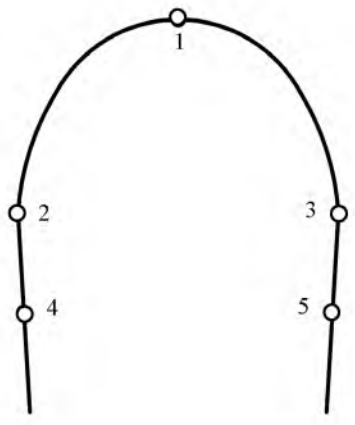


Рис.2. Контрольные точки

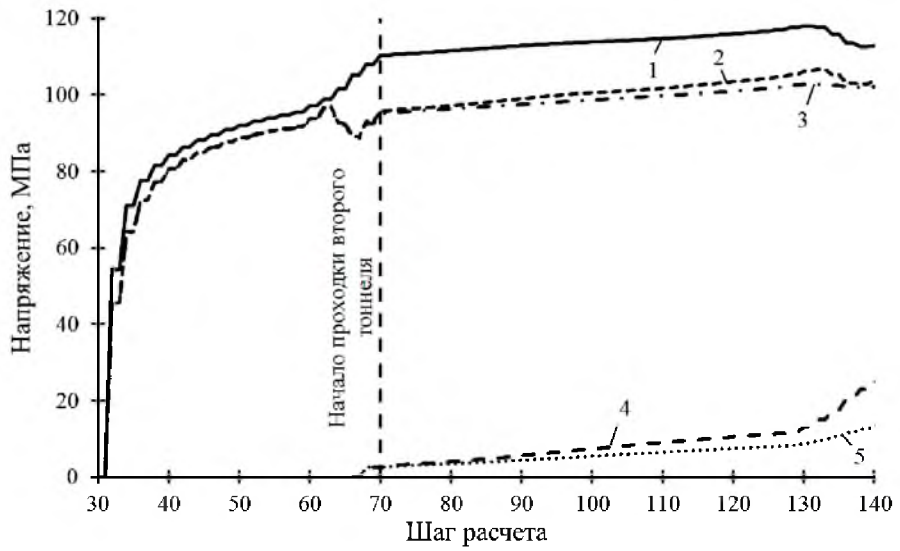


Рис.3. График формирования нормальных тангенциальных напряжений в арках временной крепи первого тоннеля

1-5 – точки

процессам, описанным ранее*. Намного больший интерес представляют процессы, протекающие в обделке при выполнении раскрытия второго тоннеля.

Отметим, что к концу строительства изучаемого участка тоннеля сформировавшиеся величины напряжений в арке временной крепи для точек 1, 2, 3, 4 и 5 составят соответственно 110-115, 95-100, 95-100, 2-4 и 2-4 МПа. Очевидно отсутствие асимметрии распределения напряжений, что обуславливается отсутствием отклоняющих факторов (геометрически сечение тоннеля и крепь симметричны, влияние рельефа земной поверхности отсутствует, влияние второго тоннеля пока отсутствует).

После начала строительства второго тоннеля сформировавшиеся напряжения в арках крепи первого тоннеля начинают постепенный рост. При этом можно сказать, что этот рост происходит линейно по мере приближения забоя второго тоннеля к рассматриваемому сечению и продолжается далее, по мере удаления забоя второго тоннеля от него также по линейному закону.

Конец равномерного линейного роста напряжений наступает в период времени, когда начинается раскрытие штроссовой части сечения второго тоннеля. На этот момент напряжения в точках 1, 2, 3, 4 и 5 составляют соответственно 115-120, 105-110, 100-105, 10-15 и 5-10 МПа.

Отметим, что уже на этапе линейного роста напряжений в их распределении в арке временной крепи можно отметить формирование асимметричной картины распределения. Это связано с односторонним влиянием второго тоннеля. При этом наибольшие напряжения формируются как раз со стороны второго тоннеля (со стороны крепи, прилегающей к межтоннельному целику); здесь на конец периода линейного роста напряжений (к концу этапа раскрытия калотты второго тоннеля) превышение величины напряжений по контуру арки меняется от 10 до 45-50 %, а в абсолютных величинах составляет 5-10 МПа.

После начала раскрытия штроссы второго тоннеля процесс формирования напряжений в разных точках протекает различно.

Так, в точках 1, 2 и 3 с поправкой на абсолютные величины напряжений происходит некоторая разгрузка. Таким образом, к концу

* *Протосеня А.Г.* Определение пространственного напряженно-деформированного состояния временной крепи железнодорожного тоннеля с учетом влияния земной поверхности / А.Г.Протосеня, Н.А.Беляков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 1. Тула, 2011.

Protosenya A. The prediction of the railroad tunnel's temporary lining stress-strain state with allowance for earth's surface relief influence / A.Protosenya, N.Belyakov // The news of Tula state university. Earth Sciences. Vol.1. Tula, 2011.

этапа раскрытия калотты в этих точках напряжения составляют соответственно 110-115 МПа для точки 1 и 100-105 МПа для точек 2 и 3. Можно сказать, что за счет этой разгрузки в конечном итоге практически компенсируется асимметрия распределения напряжений в сводовой части арки.

В точках 4 и 5 формирование напряжений в процессе раскрытия штроссы в тоннеле 2 происходит иначе, чем в точках, изученных выше. Здесь раскрытие штроссы вызывает дополнительный рост напряжений, причем в относительном выражении этот прирост весьма значителен. Происходит рост нелинейно: он увеличивает интенсивность при приближении сечения забоя по штроссе второго тоннеля к изучаемому сечению, достигает максимума прироста при раскрытии штроссы на участке, расположенном на одном уровне с изучаемым сечением, а затем постепенно затухает при удалении забоя штроссы второго тоннеля от изучаемого сечения.

Таким образом, в конечном итоге величины напряжений в точках 4 и 5 составляют соответственно 20-25 и 10-15 МПа. Прирост относительно уровня напряжений, который имелся здесь к началу раскрытия штроссы во втором тоннеле, составляет порядка 80-100 %.

Можно заметить, что в штроссовой части арки асимметрия распределения напряжений при раскрытии штроссовой части сечения второго тоннеля только увеличивается.

Оценивая полученные результаты, необходимо отметить следующее. Во-первых, раскрытие сечения второго тоннеля приводит к неравномерному перераспределению напряжений в арках временной крепи. В некоторых частях арки (в своде) появление влияния со стороны второго тоннеля проявляется в некоторой компенсации напряжений. По мере продвижения от свода арки к ее бокам и далее – к подошве тоннеля прирост напряжений от раскрытия второго тоннеля в относительном выражении увеличивается. Так, если в верхней части боков арки прирост напряжений от проявления влияния со стороны второго тоннеля в среднем составляет порядка 10-15 %, то в нижней части боков арки это уже порядка 8-10 раз (800-1000 %).

Во-вторых, влияние строительства второго тоннеля выражается явной асимметрией в конечной картине распределения напряжений в арках временной крепи и этот факт был подтвержден выполненными расчетами.

Теперь обратимся к анализу формирования сжимающих напряжений на внутреннем контуре бетона временной крепи. Для изучения был выбран участок в центре моделируемого участка первого тоннеля, расположенный вне зоны влияния граничных условий. Расположение точек на исследуемом контуре бетона временной крепи в сечении совпадает с расположением точек, указанным на рис.2.

В исследовании выполнялась оценка распределения сжимающих напряжений на внутреннем контуре временной крепи, так как именно эти напряжения представляются наиболее актуальными с точки зрения прочностной оценки конструкций временной крепи.

Приступим к изучению формирования сжимающих напряжений в бетоне временной крепи в характеристических точках. Графическая зависимость, отражающая формирование сжимающих напряжений на внутреннем контуре бетона временной крепи, представлена на рис.4.

Для анализа в рамках статьи участок графической зависимости, расположенной до этапа начала строительства второго тоннеля, по обозначенным выше причинам особого интереса не представляет.

Отметим, что к концу строительства изучаемого участка тоннеля в точках 1, 2, 3,4 и 5 внутреннего контура бетона временной крепи формируются напряжения сжатия, составляющие соответственно 12, 10, 10, 1,6 и 1,6 МПа. Из этих данных можно сделать вывод о наличии симметрии в картине распределения напряжений на внутреннем контуре бетоне временной крепи.

Выполняя анализ приведенной графической зависимости (рис.4), следует сделать следующие выводы. До начала выполнения раскрытия штроссы второго тоннеля происходит довольно близкий к линейному рост напряжений сжатия на внутреннем контуре бетона временной крепи. Ситуация сходна с той, что наблюдалась в арках временной крепи. Единственным исключением являет-

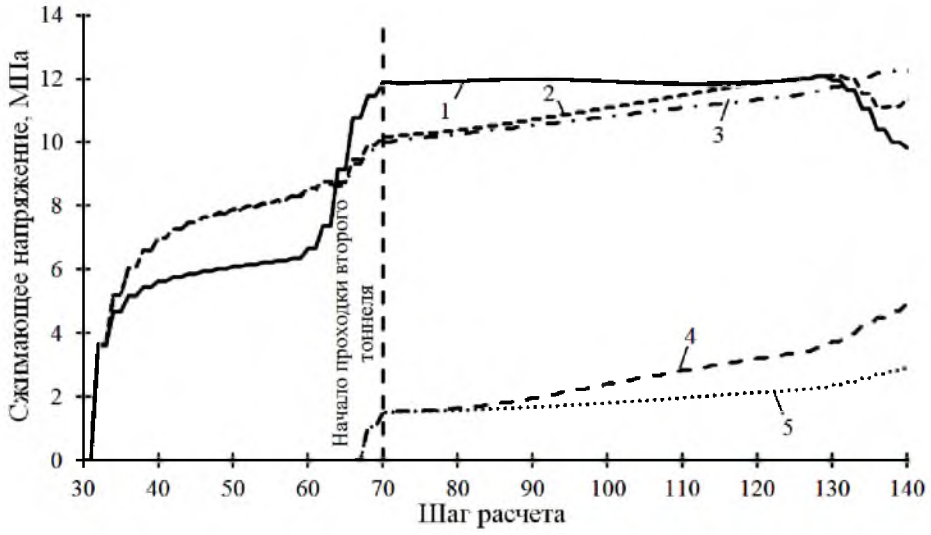


Рис.4. График формирования сжимающих напряжений в бетоне временной крепи первого тоннеля
1-5 – точки

ся точка 1: здесь до начала раскрытия штроссовой части сечения второго тоннеля (т.е. на этапе строительства калоттной части сечения этого тоннеля) изменение напряжений находится в рамках погрешности дискретного расчета и составляет к концу этого этапа те же 12 МПа, что и перед строительством второго тоннеля.

Касательно величин напряжений сжатия в точках 2, 3, 4 и 5 к концу этапа раскрытия калотты второго тоннеля на исследуемом участке можно заключить, что они составят соответственно 12, 11,5, 3,6 и 2,4 МПа. Рост величин напряжений для верхней части внутреннего контура чернового бетона временной крепи составил 15-20 %, а для нижней его части 2-2,5 раз (200-250 %). Таким образом, очевидно можно выделить формирование асимметрии картины распределения напряжений сжатия на внутреннем контуре бетона временной крепи.

Переходя к анализу формирования сжимающих напряжений при выполнении раскрытия штроссовой части сечения второго тоннеля, отметим следующее. Во-первых, какого-либо единого для всех точек внутреннего контура чернового бетона временной крепи закона формирования напряжений на этом этапе нет. В ряде точек (1 и 2) происходит компенсация напряжений, в результате которой они довольно существенно уменьшаются. На конец расчетного периода в точке 1 напряжения сжатия уменьшаются с отмеченных на предыдущем этапе 12 МПа до 10 МПа (т.е. снижение составляет 16-17 %), а для точки 2 снижение происходит с отмеченных на предыдущем этапе 12 МПа до 11,2 МПа (т.е. снижение составляет 6-7 %).

В остальных исследуемых точках внутреннего контура бетона временной крепи при раскрытии штроссовой части второго тоннеля происходит рост напряжений. При этом во всех случаях этот рост более интенсивен, чем на предыдущем этапе, когда производилось строительство калоттной части сечения второго тоннеля. Касательно самого закона роста напряжений можно сказать, что он довольно близок к линейному.

В конечном итоге для точек 3, 4 и 5 соответственно напряжения сжатия на внутреннем контуре бетона временной крепи составят соответственно 12,2, 4,8 и 2,8 МПа. Рост напряжений в этих точках по сравнению с величиной напряжений на предыдущем этапе (на конец этапа раскрытия калоттной части сечения второго тоннеля) составит соответственно 6, 33-34 и 16-17 % соответственно.

Во-вторых, совершенно очевидно усиление асимметрии картины распределения

напряжений. При этом на некоторых участках внутреннего контура бетона временной крепи это приводит к положительным изменениям – уменьшению величин сжимающих напряжений.

Оценивая полученные результаты, отметим следующее. Во-первых, влияние на картину формирования напряжений со стороны второго тоннеля выражается в концентрации напряжений сжатия в бетоне временной крепи со стороны тоннеля. Концентрация напряжений сильно неравномерна по контуру тоннеля. В шелыге свода при этом наблюдается обратный эффект уменьшения действующих напряжений.

Во-вторых, неравномерность концентрации напряжений приводит в конечном счете к появлению значительной асимметрии картины распределения напряжений.

Также необходимо отметить, что для рассмотренных стальных арок и для бетона временной крепи законы формирования напряжений в элементах временной крепи, с учетом поправки на величины действующих напряжений, являются весьма сходными.

Представленный в статье подход к моделированию геомеханических процессов, протекающих в обделках взаимовлияющих тоннелей и во вмещающем массиве, представляет возможность получить решение достаточно сложной пространственной задачи геомеханики. Данную методику можно применять для расчета комплексов тоннельных выработок практически любой степени сложности с учетом технологических особенностей строительства каждой из них, что позволяет в конечном итоге получать результаты высокой степени достоверности.