

УДК 622.28

**Н.Н. Фотиева, Н.С. Булычев, Е.С. Фирсанов,
П.В. Деев**

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОБДЕЛОК ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОННЕЛЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Семинар № 18

В Тульском государственном университете разработан метод расчета и оценки несущей способности обделок глубоко заложенных параллельных тоннелей произвольного поперечного сечения, основанный на современных представлениях механики подземных сооружений о взаимодействии подземных конструкций и массива пород как элементов единой деформируемой системы. Метод базируется на аналитическом решении задачи теории упругости (расчетная схема приведена на рис. 1) о плоской деформации линейно деформируемой среды, моделирующей массив, механические свойства которой характеризуются модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 , ослабленной конечным числом N произвольно расположенных отверстий различных форм (с одной осью симметрии), подкрепленных кольцами из других материалов, имеющих деформационные характеристики E_j , ν_j , ($j = 1, \dots, N$), моделирующими обделки тоннелей, расположенных на глубинах H_j ($j = 1, \dots, N$), отсчитываемых от центров, помещенных в точках $z_j = x_j + iy_j$ ($j = 1, \dots, N$).

Действие собственного веса пород моделируется наличием в среде поля начальных напряжений, линейно изменяющихся по глубине, определяемых формулами:

$$\sigma_x^{(0)(0)} = -\gamma(H_1 - x), \quad \sigma_y^{(0)(0)} = -\lambda\gamma(H_1 - x), \\ \tau_{x,y}^{(0)(0)} = 0, \quad (1)$$

где γ - удельный вес пород, λ - коэффициент бокового давления грунта в ненарушенном массиве, H_1 - глубина заложения первого тоннеля, отсчитываемая от центра его поперечного сечения z_1 , в который помещено начало координат.

Считается, что среда S_0 и кольца S_j ($j = 1, \dots, N$) деформируются совместно, то есть на линиях контакта $L_{0,j}$ ($j = 1, \dots, N$) выполняются условия непрерывности векторов смещений и полных напряжений. Внутренние контуры колец $L_{1,j}$ ($j = 1, \dots, N$) свободны от действия внешних сил.

Задача решена с использованием теории аналитических функций комплексного переменного [1], модификации метода Д.И. Шермана, описанной в работе [2], аппарата конформных отображений и комплексных рядов. Такой подход позволяет свести решение задачи к хорошо сходящемуся

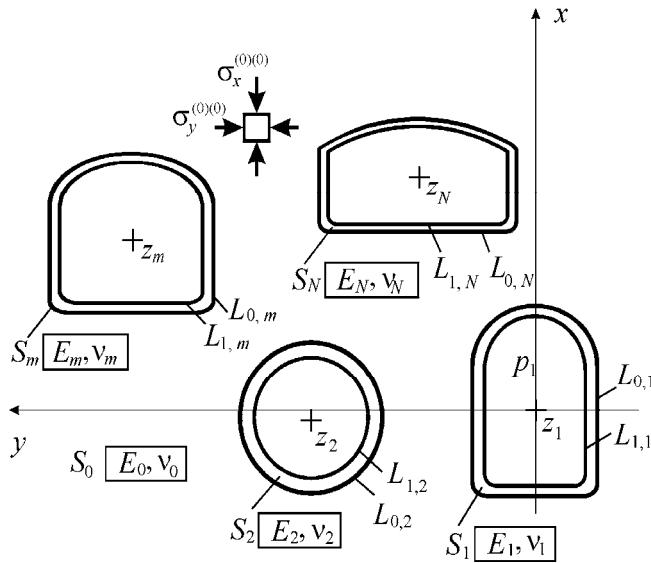


Рис. 1. Расчетная схема

$$\alpha_j^* = 0,6e^{-1,38l_j/R_j}$$

$$(j=1,\dots,N) \quad (2)$$

где R_j ($j=1,\dots,N$) - средние радиусы наружных контуров поперечных сечений обделок.

Влияние последовательности проведения и крепления тоннелей может быть учтено таким же образом, как это описано в работе [2], то есть путем последовательного рассмотрения ряда расчетных схем, соответствующих каждой стадии строительства с использованием множителей α_j^* ($j=1,\dots,N$).

Для оценки несущей способности каждой из обделок определяется коэффициент запаса по формуле

$$k_s = \min \left(\frac{R_{bc}}{\left| \sigma_\theta^{(in)(c)} \right|_{\max}}, \frac{R_{bt}}{\left| \sigma_\theta^{(in)(t)} \right|_{\max}} \right), \quad (3)$$

где $\left| \sigma_\theta^{(in)(c)} \right|_{\max}$, $\left| \sigma_\theta^{(in)(t)} \right|_{\max}$ - максимальные по абсолютной величине сжимающие (отрицательные) и растягивающие (положительные) нормальные тангенциальные напряжения на внутреннем контуре поперечного сечения соответствующей обделки, R_{bc} , R_{bt} - расчетные сопротивления материала обделки сжатию и растяжению.

Ниже в качестве примера приводятся результаты расчета обделок на одном из участков тоннеля № 6 и параллельной ему штолни автодороги Джугба-Сочи на второй очереди строительства обхода г. Сочи. Тоннель проходит в относительно однородном массиве пород, сложенном преимущественно аргиллитами зеле-

итационному процессу [3], в каждом приближении которого последовательно используются решения, полученные для каждого из колец, подкрепляющего соответствующее отверстие, при граничных условиях, содержащих некоторые дополнительные слагаемые, отражающие влияние остальных подкрепленных отверстий. Эти слагаемые представляются в форме рядов Порана, неизвестные коэффициенты которых, полагаемые в нулевом приближении равными нулю, затем уточняются на каждом шаге итераций. Решения внутренних задач, составляющих основу итерационного процесса, получены с помощью метода, аналогичного описанному в работе [4].

С целью приближенного учета влияния расстояний l_j ($j=1,\dots,N$) от сооружаемых обделок до забоев тоннелей в результаты расчета каждой из конструкций вводится корректирующий множитель α_j^* , определяемый по формуле, полученной на основе численного моделирования пространственной осесимметричной задачи [5]:

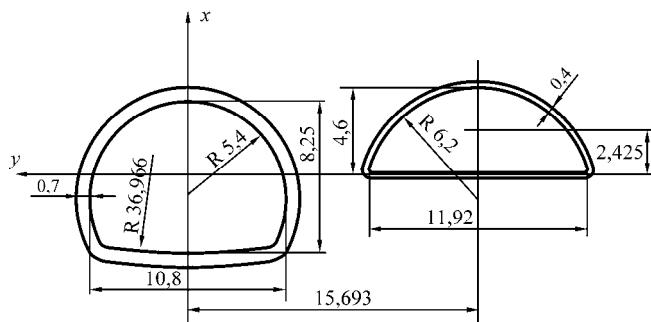


Рис. 2. Рассчитываемое по-перечное сечение тоннеля и штольни

новато-серого цвета, известковистыми и известковыми. В районе южного портала присутствуют песчаники полимиктовые, известковистые (до 17 %). Породы трещиноватые и сильнотрещиноватые.

Поперечное сечение тоннеля и штольни показано на рис. 2 (штольня проходится с перспективой раскрытия правого тоннеля на полное сечение).

Исходные данные для расчета, предоставленные ООО "Тоннельдорстрой", приняты следующими: глубина заложения тоннеля $H = 36,1$ м, модуль деформации пород $E_0 = 1000$ МПа, коэффициент Пуассона пород $\nu_0 = 0,35$, удельный вес пород $\gamma = 0,0231$ МН/м³, коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве $\lambda = 0,6$, модуль деформации бетона обделок $E_1 = E_2 = 30000$ МПа, коэффициент Пуассона бетона $\nu_1 = \nu_2 = 0,2$.

Расстояние от сооружаемой обделки до забоя тоннеля $l_1 = 3$ м, от обделки, сооружаемой в сводовой части штольни, до забоя штольни – $l_2 = 3$ м, крепление лотка штольни осуществляется с отставанием на $\tilde{l}_2 = 50$ м от забоя штольни.

Расчетные сопротивления бетона В25 составляют: $R_{bc} = 14,5$ МПа, $R_{bt} = 1,05$ МПа.

Расчет обделок на действие собственного веса пород производился с использованием программы FOSFIR-1, реализующей описанный выше метод. При этом корректирующие множители α_1^* для тоннеля и α_2^* для сводовой части штольни определялись по формуле (2), а соответствующий множитель для лотковой части штольни, теоретически обращающийся в нуль, принимался в запас прочности конструкции $\tilde{\alpha}_2^* = 0,15$.

Распределение нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_\theta^{(in)}$ (в МПа) на внутренних контурах поперечного сечения обделок тоннеля и штольни показано на рис. 3.

Как видно из рис. 3, наибольшие сжимающие (отрицательные) напряжения возникают вблизи угловых точек контуров сечения обделок, а наибольшие растягивающие (положительные) напряжения – в лотковой части обделок. При этом коэффициенты запаса несущей способности оказываются меньше единицы – $k_s = 0,85, 0,68$ соответственно в потках обделок тоннеля и штольни, что требует их армирования.

Отметим, что предварительный расчет указанных обделок на активные нагрузки приводит к прямо противоположному выводу о необходимости армирования сводовой части обделок, в то время как коэффициенты запаса в сечениях сводов, полученные при рассмотрении взаимодействия конструкций с массивом пород с учетом взаимного влияния тоннеля

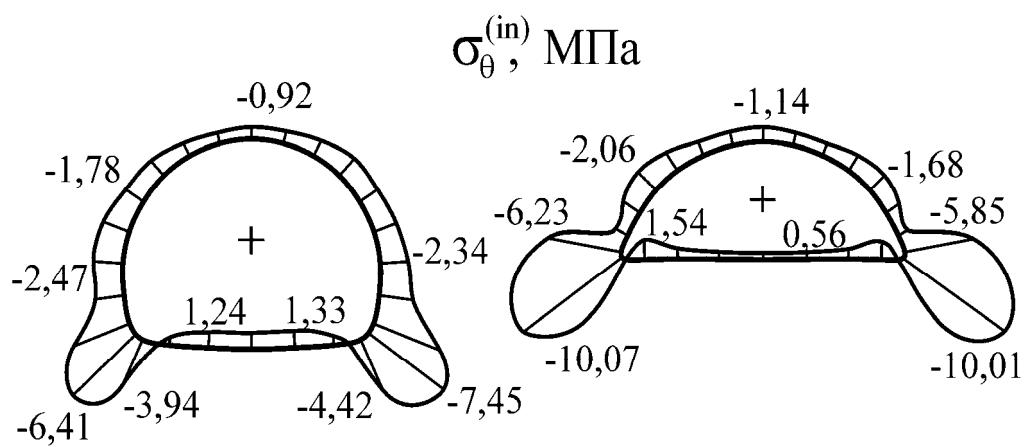


Рис. 3. Напряжения, возникающие на внутренних контурах обделок тоннеля и штольни

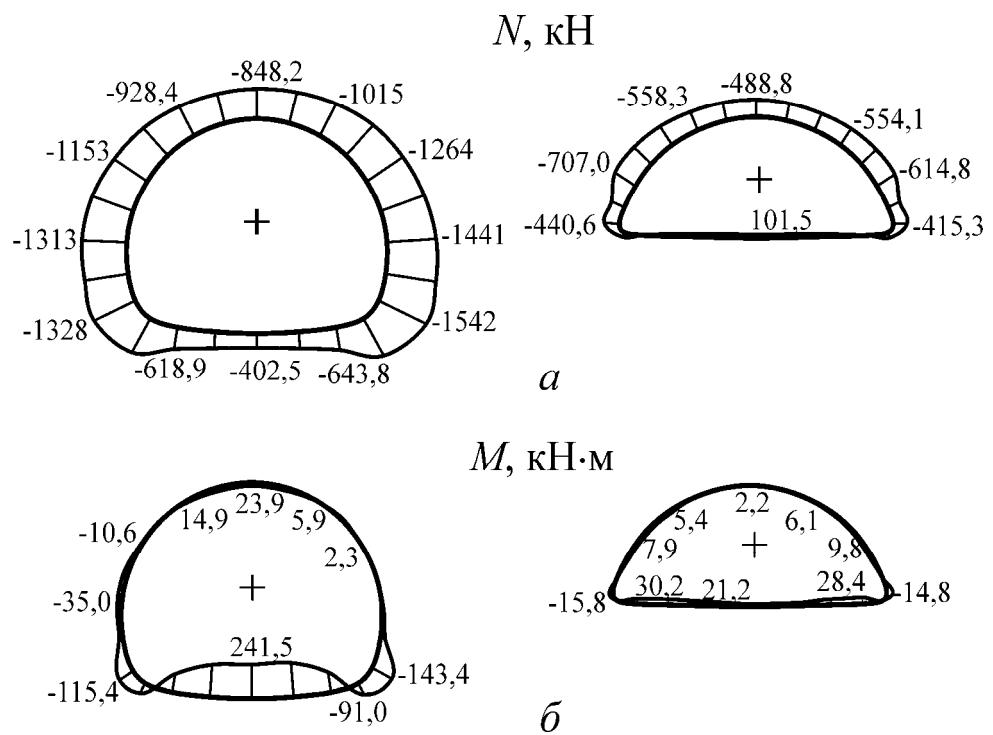


Рис. 4. Продольные силы (а) и изгибающие моменты (б) в сечениях обделок тоннеля и штольни

и штольни, составляют $k_s = 8,15$, $7,04$, а в местах наибольшей концентрации сжимающих напряжений (вблизи угловых точек сечений) $k_s = 1,95, 1,44$ соответственно.

Ниже на рис. 4 а, б приведены эпюры усилий – продольных сил N и изгибающих моментов M в сечениях обделок.

Произведенные дополнительно расчеты обделок с учетом возможных сейсмических воздействий землетрясения интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64 подтвердили необходимость преимущественного армирования лотковой части обделок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости/ Н.И. Мусхелишвили – М., Наука, 1966.
2. *Фотиева Н.Н.* Расчет крепи параллельных выработок в сейсмических районах/ Н.Н. Фотиева, А.Н. Козлов – М., Недра, 1992.
3. *Fotieva N.* Design of shallow tunnel linings / Fotieva N., Bulychev N., Sammal A. // Proc. of ISRM International Symposium, Torino, Italy, 1996. – Balkema: pp. 654-661.
4. *Фотиева Н.Н.* Расчет обделок тоннелей некругового поперечного сечения / Н.Н. Фотиева – М., Стройиздат, 1974.
5. *Bulychev N.* The stress-strain state of tunnel linings and the surrounding rock mass in the vicinity of a tunnel face / Bulychev N., Fotieva N., Fowell R. // Proc. of Underground Construction 2001 International Symposium, 18-20 September 2001. – London: Balkema. – pp. 439-448. ГИАБ

Коротко об авторах

Фотиева Н.Н., Булычев Н.С., Фирсанов Е.С., Деев П.В. – Тульский государственный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 18 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. Б.А. Картозия.



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ЕЗЕРСКИЙ Михаил Юревич	Синтез технологических систем угольных шахт при обосновании проектных решений	25.00.21	к.т.н.

