

Исследование напряженно-деформированного состояния обделки подземных сооружений в зонах сопряжений

М.С. Пleshko¹, И.В. Войнов², А.А. Насонов³

¹ *Донской государственный технический университет*

² *Ростовский государственный университет путей сообщения*

³ *Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова*

Аннотация: В статье рассмотрено численное моделирование зоны сопряжения тоннеля с вертикальным стволом. Разработка и расчет моделей осуществлялся в программном комплексе «ЛИРА», реализующем метод конечных элементов. Разработана пространственная численная модель сопряжения тоннеля и вертикального ствола. В результате расчетов определены все компоненты объемного тензора напряжений в конечных элементах обделки и породного массива, перемещения и деформации в узлах конечных элементов. Задача решена в упругопластической постановке шагово-итерационным методом. Установлено, что в характерных зонах влияния сопряжений, наблюдается значительное увеличение интенсивности эквивалентных напряжений, которое приводит к снижению запаса несущей способности обделки в 2 раза и более по сравнению с протяженными участками подземных сооружений.

Ключевые слова: тоннель, ствол, сопряжение, напряженно-деформированное состояние, породный массив, бетонная крепь.

1. Введение

Современный комплекс транспортного тоннеля представляет собой сложную подземную сеть, которая, помимо самого тоннеля, включает обслуживающие штольни, камеры, сбойки, вертикальные стволы и др. Сопряжения основной тоннельной выработки с перечисленными сооружениями характеризуются большими пролетами и сложной пространственной геометрией. Это может привести к усложнению условий работы обделки при эксплуатации тоннеля и требует отдельного анализа при обосновании параметров несущих конструкций тоннеля [1-2].

Оценка несущей способности обделки тоннельного комплекса в зонах сопряжений методами строительной механики или механики сплошной среды весьма затруднена. На помощь приходят численные методы математического моделирования, получающие все большее распространение для решения аналогичных задач [3-7]. В качестве примера такого подхода в статье

рассмотрено численное моделирование зоны сопряжения тоннеля с вертикальным стволом.

2. Методика исследования

Разработка и расчет моделей осуществлялся в программном комплексе «ЛИРА», реализующем метод конечных элементов.

Рассмотрена односторонняя схема сопряжения пролетом 6,0 м, примыкающая к стволу диаметром также 6,0 м. Сопряжение и ствол в рассматриваемой зоне закреплены железобетонной обделкой толщиной 500 мм, класс бетона В30. С целью сравнения, параллельно выполнялся расчет модели протяженного участка ствола в аналогичных условиях.

Пространственные численные модели имели форму цилиндра, его размеры для исключения влияния граничных условий приняты: высота – 80 м; диаметр – 90 м. Для разбивки модели использован универсальный пространственный изопараметрический восьмиузловой конечный элемент. Размеры конечных элементов на внешних областях модели составляли 2,5 - 5,0 м, на внутренних – 0,25 - 0,5 м. Таким образом, применён принцип совмещения густой и разреженной сеток для уменьшения объема информации, описывающей численную модель. Граничные условия на боковой и нижней поверхностях модели заданы в форме ограничения перемещений по нормали к ним, верхняя грань загружалась равномерно распределенным горным давлением.

Задача решалась в упругопластической постановке шагово-итерационным методом. В результате расчетов определялись все компоненты объемного тензора напряжений в конечных элементах обделки и породного массива, перемещения и деформации в узлах конечных элементов. Далее определялись главные напряжения σ_1 , σ_2 , σ_3 и в соответствии с критерием прочности Кулона-Мора – эквивалентные напряжения:

$$\begin{aligned}\sigma_{\vartheta} &= \sigma_1 - \chi \cdot \sigma_3 ; \\ \sigma_s &= \lambda \cdot \sigma_1 - \sigma_3 ,\end{aligned}\tag{1}$$

где $\chi = \sigma_0^+ / \sigma_0^-$; $\lambda = \sigma_0^- / \sigma_0^+$,

здесь σ_0^+ – предельное напряжение при одноосном растяжении;

σ_0^- – то же, при сжатии [9-10].

3. Результаты моделирования

С помощью разработанных численных моделей выполнена серия расчетов, получен массив данных по напряженно-деформированному состоянию обделки в зоне влияния сопряжения, выполнен количественный и качественный анализ.

Типичная картина распределения эквивалентных напряжений σ_{ϑ} в зоне сопряжения в форме изополей представлена на рис. 1.

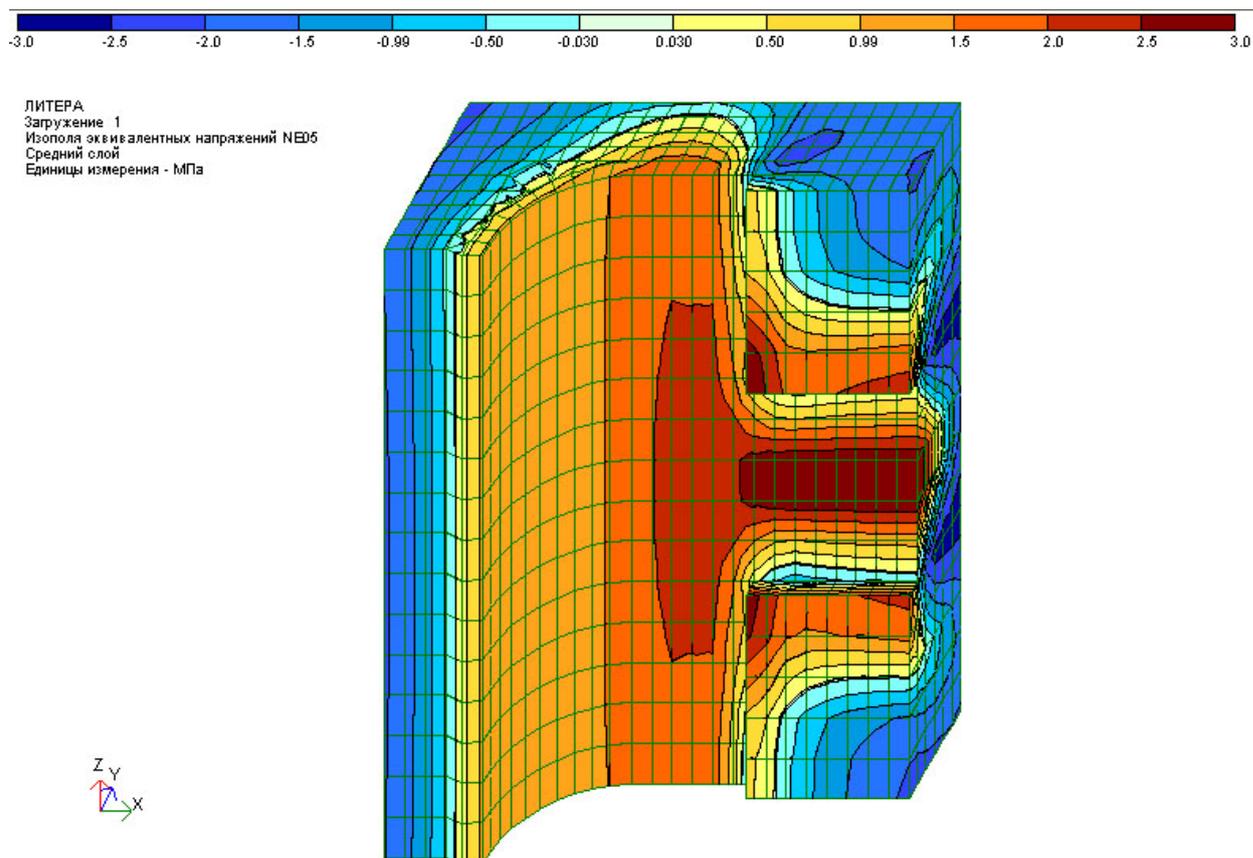


Рис. 1. – Изополя эквивалентных напряжений в зоне сопряжения

(фрагмент разреза численной модели)

Анализ распределения эквивалентных напряжений позволяет выделить несколько характерных зон на рассматриваемом участке (рис. 2).

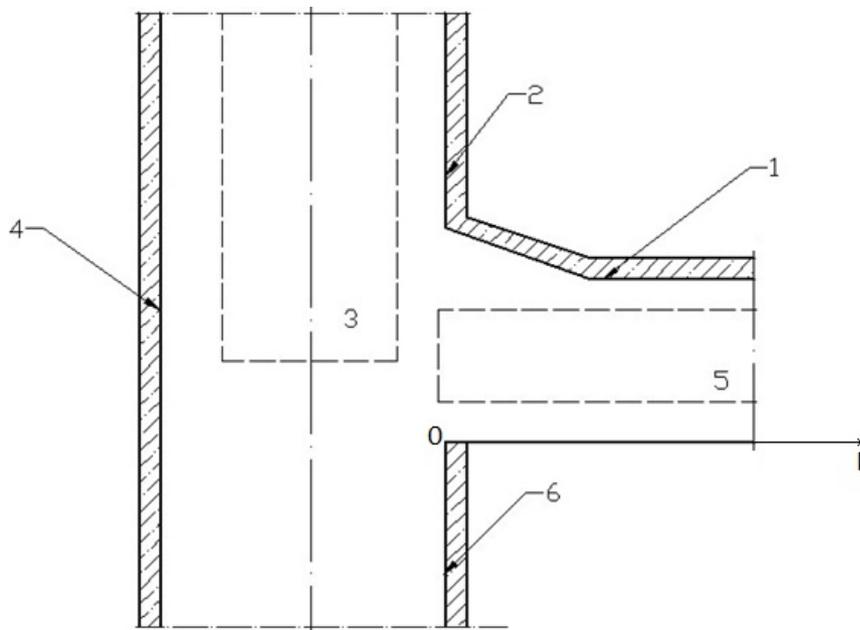


Рис. 2. – Выделенные зоны участка сопряжения ствола:

1 – свод сопряжения; 2 – стенка ствола над сводом; 3 – стенка ствола, примыкающая к проему сопряжения; 4 – стенка ствола напротив проема сопряжения; 5 – стенка сопряжения; 6 – стенка ствола ниже сопряжения

Для оценки интенсивности эквивалентных напряжений в выделенных зонах был введен параметр $\sigma_{отн}$:

$$\sigma_{отн} = \frac{\sigma_{э.сnp}}{\sigma_{э.ств}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{э.сnp}$ – максимальные эквивалентные напряжения в обделке в зоне сопряжения;

$\sigma_{э.ств}$ – максимальные эквивалентные напряжения в обделке ствола на протяженном участке в аналогичных условиях.

На рис. 3 представлена динамика изменения параметра $\sigma_{отн}$ в зоне 1 и 5 по мере удаления от проема сопряжения по оси L (см. рис. 2).

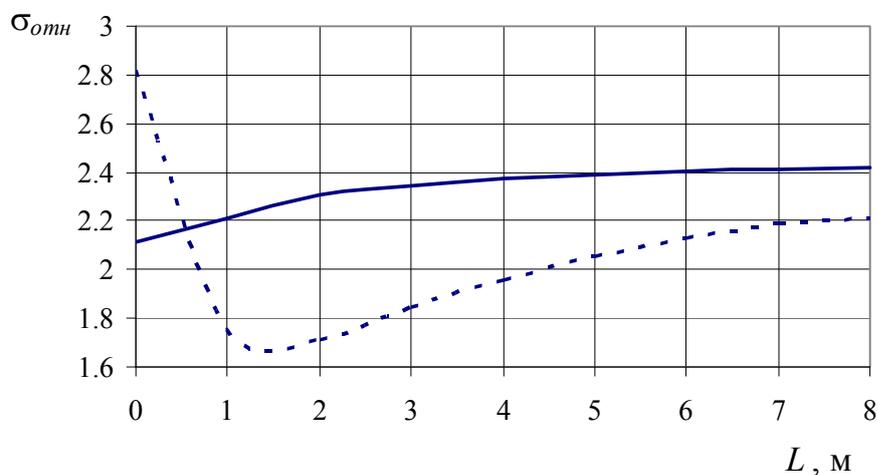


Рис. 3. – Графики изменения $\sigma_{отн}$:

— в зоне 5; - - - в зоне 1;

На рис. 4 представлены графики изменения $\sigma_{отн}$ в зоне 2 и 6 по мере удаления соответственно от свода и почвы сопряжения.

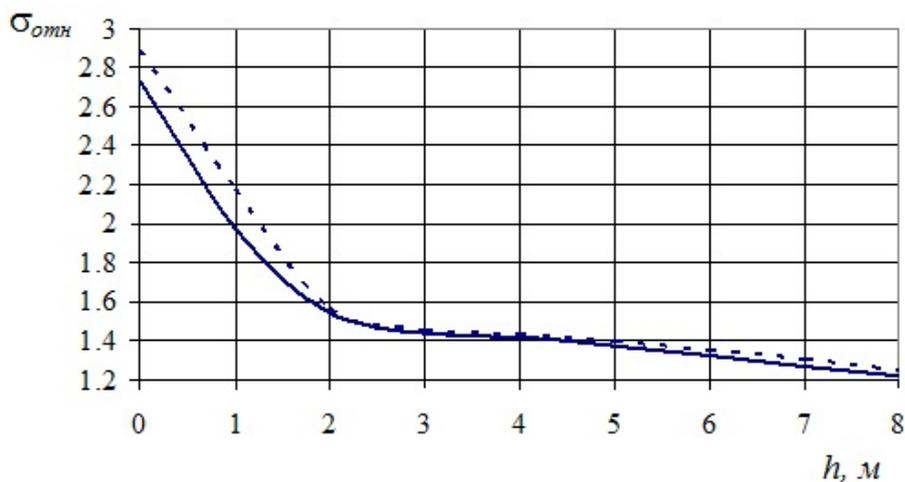


Рис. 4. – Графики изменения $\sigma_{отн}$:

— в зоне 6; - - - в зоне 2;

На рис. 5 приведены графики изменения $\sigma_{отн}$ в зоне 3 и 4 в направлении вверх по стволу. За начало отчета принята высотная отметка оси L (см. рис. 2).

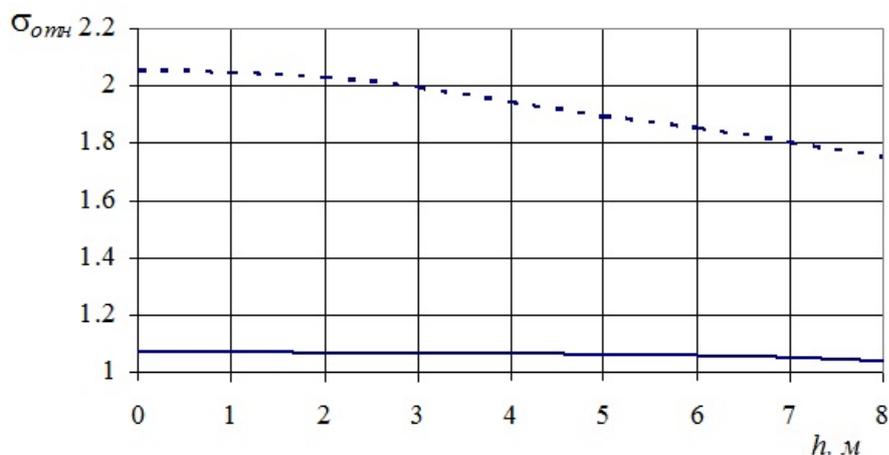


Рис. 5. – Графики изменения $\sigma_{отн}$:

— в зоне 4; - - - в зоне 3;

Представленные графики показывают, что во всех рассмотренных зонах, кроме четвертой, наблюдается значительное увеличение интенсивности эквивалентных напряжений, которое приводит к снижению запаса несущей способности обделки в 2 раза и более.

4. Выводы

Таким образом, в результате исследования подтверждены известные практические данные о том, что геомеханическая ситуация в зоне сопряжений подземных сооружений существенно сложнее чем на протяженных участках. При длительной эксплуатации это может привести к деформациям и разрушениям обделки, увеличению притока воды в тоннель, развитию процесса трещинообразования в окружающем породном массиве. Для повышения эффективности поддержания сопряжений, на наш взгляд, необходимо обосновать управляющие воздействия с учетом динамики изменения напряженно-деформированного состояния обделки в пространстве и времени. В частности, целесообразно проанализировать опыт эксплуатации и монито-

ринга сопряжений глубоких шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях [8-10].

Литература

1. Н.С. Булычев. Механика подземных сооружений. Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1994. 382 с.
2. Плешко М.С., Насонов А.А., Пашкова О.В. Разработка технических решений по повышению устойчивости участков сопряжений вертикальных стволов // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 5 (24). С. 15.
3. Панкратенко А.Н., Нгуен З.Ф., Саммаль А.С., Нгуен С.М. Исследование расчета многослойной крепи тоннелей, сооружаемых в технологически неоднородном массиве пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S13. С. 3-12.
4. Bock, S. Numerical modelling of a void behind shaft lining using FDM with a concrete spalling algorithm. Journal of Sustainable Mining. 2014. 13(2), Pp. 14 - 21.
5. Панкратенко А.Н., Нгуен К.Х., Самаль А.С., Бегалинов А.Б., Амантолов Д.Б. Математическое моделирование влияния технологии строительства микротоннелей методом прокола на напряженное состояние вмещающего массива и конструкцию крепи существующего тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 11. С. 252-258.
6. Саммаль А.С., Панкратенко А.Н., Нгуен К. Прогноз изменения напряженного состояния обделки тоннеля при проведении вблизи него выработки методом микротоннелирования // Транспортное строительство. 2015. № 1. С. 14-17.
7. Панкратенко А.Н., Саммаль А.С., Нгуен К.Х. Математическое моделирование напряженного состояния конструкции крепи тоннеля и окру-

жающего массива пород при проведении в его окрестности выработки способами микротоннелирования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 9. С. 277-281.

8. Страданченко С.Г., Плешко М.С., Армейсков В.Н. О необходимости проведения комплексного мониторинга подземных объектов на различных стадиях жизненного цикла // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994.

9. Pleshko M.S., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A., Pashkova O.V. Study of technical solutions to strengthen the lining of the barrel in the zone of influence of construction near-wellbore production. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. VOL. 10. NO. 1, JANUARY 2015. Pp. 14-19.

10. Плешко М.С., Насонов А.А., Гармонин Р.Э., Сироткин А.Ю. Элементы геотехнического мониторинга подземных сооружений, закрепленных железобетонными анкерами // Инженерный вестник Дона. 2015. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3196.

References

- 1.N.S. Bulychev. Mehanika podzemnyh sooruzhenij. [Mechanics of underground structures]. Ucheb. dlja vuzov. M.: Nedra, 1994. 382 p.
2. Pleshko M.S., Nasonov A.A., Pashkova O.V. Internet-zhurnal Naukovedenie. 2014. № 5 (24). Pp. 15.
3. Pankratenko A.N., Nguen Z.F., Sammal' A.S., Nguen S.M. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). 2016. № S13. pp. 3-12.
4. Bock, S. Numerical modelling of a void behind shaft lining using FDM with a concrete spalling algorithm. Journal of Sustainable Mining. 2014. 13(2), Pp. 14 - 21.



5. Pankratenko A.N., Nguen K.H., Samal' A.S., Begalinov A.B., Amantolov D.B. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). 2015. № 11. Pp. 252-258.
6. Sammal' A.S., Pankratenko A.N., Nguen K Transportnoe stroitel'stvo. 2015. № 1. Pp. 14-17.
7. Pankratenko A.N., Sammal' A.S., Nguen K.H. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). 2014. № 9. Pp. 277-281
8. Stradanchenko S.G., Pleshko M.S., Armejskov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994.
9. Pleshko M.S., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A., Pashkova O.V. Study of technical solutions to strengthen the lining of the barrel in the zone of influence of construction near-wellbore production. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. VOL. 10. №1, JANUARY 2015. Pp. 14-19.
10. Pleshko M.S., Nasonov A.A., Garmonin R.Je., Sirotkin A.Ju. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2015. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3196.